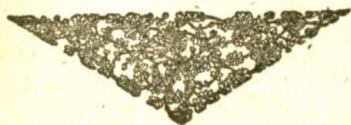
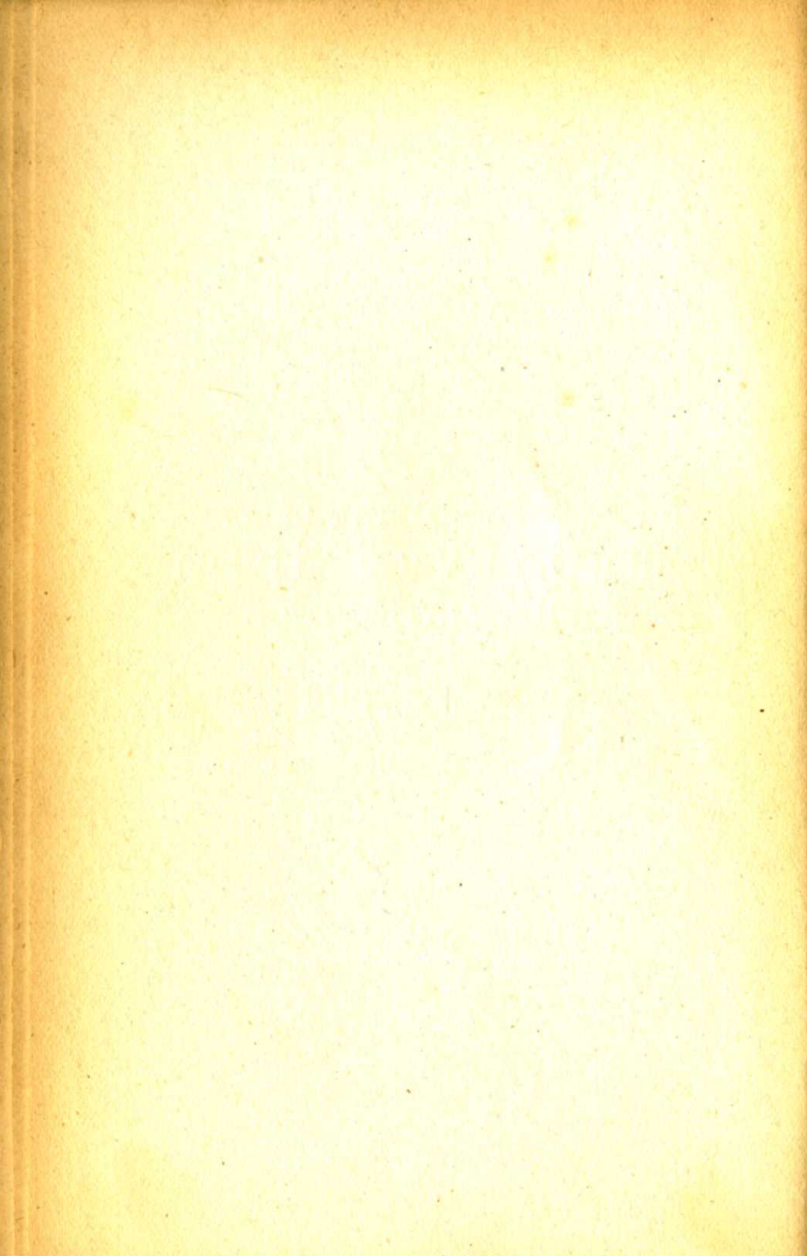
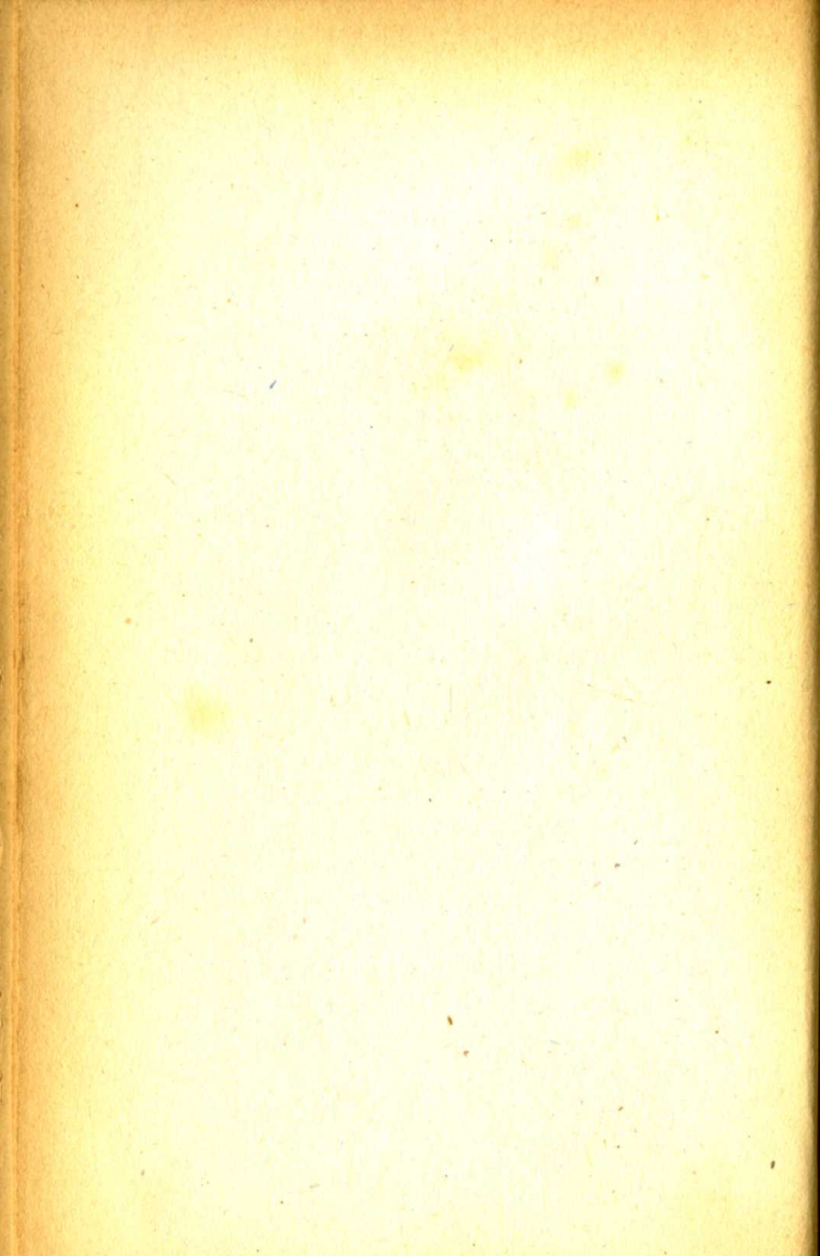
CIÒ CHE SI PUÒ CAPIRE DELLA TEORIA DELLA RELATIVITÀ SENZA LA MATEMATICA

DI PAOLO KIRCHBERGER

CARABBA EDITORE
LANCIANO

CIÒ CHE SI PUÒ CAPIRE DELLA
TEORIA DELLA RELATIVITÀ
SENZA LA MATEMATICA

Se medito la cosa
ed essa ben scopro
sta forse il tutto in posa;
ed io stesso giro.

GOETHE

DI rado un problema ha risvegliato nel gran pubblico della Germania tanto interesse quanto quello suscitato dalla Teoria della Relatività, specie dopo che Einstein ha tentato con le sue audaci concezioni di svelare l'enigma della gravità. Si potrebbe provare un'intima gioia dal fatto che finalmente, una volta tanto, qualche cosa di diverso dalle lacrimevoli lotte politiche di casa nostra commuova gli animi, se il dibattito non fosse alle volte condotto con passioni e mezzi che ricordano troppo la politica, invece di aspettare con calma i risultati definitivi della prova, necessariamente progressiva, dell'altissimo postulato di questa teoria. Si pecca in ciò "*extra muros et intra.*" La presente opera si tiene ben lontana da simili traviamenti. Essa si propone di far entrare il lettore curioso, senza pretendere da lui una preparazione scientifica speciale, nel mondo della teoria della relatività. Appoggiandosi alle opere dei maestri, essa raggiunge questo scopo in virtú di metodi singolari, ma ben ponderati ed irreprensibili. Il suo stile facile, la sua piacevole esposizione, risparmiano fatica al lettore; io le do ben volentieri la parola d'introduzione che l'autore mi domanda.

M. v. LAUE

PREFAZIONE

" DITEMI, in che cosa consiste precisamente la teoria della relatività? " Molte persone che s' interessano ai problemi filosofici, mi hanno piú volte fatto questa domanda, ed io non ho potuto sempre, secondo il loro desiderio, dar loro in cinque minuti una spiegazione soddisfacente. Queste conversazioni, ciò non pertanto, non mi sono riuscite completamente inutili; esse mi hanno permesso di veder bene le difficoltà che la teoria presenta a noi tutti indistintamente, ed hanno rafforzato la mia convinzione che fosse possibile esporne i punti principali senza l' aiuto di alcun calcolo. Date queste condizioni bisogna, naturalmente, rinunziare a molti particolari; se fosse differentemente le matematiche non sarebbero di alcuna utilità. Ma il lettore, del quale io sopratutto mi occupo, è quello che, pur non desiderando conoscere la forma della trasformazione di Lorentz, si interessa tuttavia delle idee fondamentali: relatività del tempo e dello spazio, possibilità di verificare la teoria con i fatti; e non mi pare di dovergliene interdire l' intelligenza anche se la sua cultura matematica non è sufficiente. Del resto, quegli stessi che ne potrebbero seguire tutto lo sviluppo, spesso sono lieti di non dover per nulla trar partito dalle loro cognizioni. Su questa materia vi sono già molte opere di volgarizzazione, ma questa è una parola molto relativa: mentre un iniziato non incontra alcuna difficoltà a concepire dei cronometri collegati all' asse degli x' del sistema mobile K' e osservati dal sistema in stato di quiete K, l' attenzione del lettore, poco abituato a queste astrazioni, ne è talmente assorbita che non le si può piú fare intendere nulla su queste questioni, che sono tutt' altro che semplici. Certo però, questi tentativi di esposizione della teoria sotto una forma popolare non sono stati senza influenza sul mio lavoro; le numerose memorie filosofiche del signor Petzoldt, le opere dei signori Angersbach e Bloch (vedere la bibliografia alla fine del volume), le molteplici conversazioni personali

che io ho potuto avere con questi tre autori, sono le fonti alle quali io ho attinto il piú; e con tutto ciò io non avrei scritto questo piccolo libro se non avessi creduto di poterlo rendere accessibile ad un notevole numero di lettori, ai quali tali opere rimangono interdette.

Il Signor professore v. Laue mi ha voluto usare la gentilezza di dare una scorsa al mio lavoro prima di stamparlo, di discutere con me alcuni punti su cui potevano sorgere dubbi, di aiutarmi nella correzione delle bozze di stampa, e di testimoniare al pubblico con la sua prefazione la scrupolosa coscienza scientifica del mio lavoro. Per me è un gradito dovere esprimere ad un uomo che io venero l'espressione della mia sincera gratitudine.

Berlino, Nikolassee, agosto 1920.

PAOLO KIRCHBERGER

PREFAZIONE ALLA SECONDA E TERZA EDIZIONE

A PIÚ riprese, delle conferenze pubbliche sulla relatività mi hanno offerto l'occasione, che io ho colto con piacere, di riflettere su alcuni particolari, e di portare dei nuovi chiarimenti.

La seconda edizione dà una nuova spiegazione dell'apparente incompatibilità delle esperienze di Fizeau e di Michelson, un secondo esempio della relatività del tempo, delle spiegazioni sulla correlazione delle relatività del tempo e dello spazio, sulla variazione della massa, l'esperienza del bicchiere di Newton, etc. La terza edizione, con alcune modificazioni, poco importanti, contiene un capitolo cosmogonico.

Tra i numerosi amici che questo volume si è guadagnati io vorrei rivolgere particolari ringraziamenti ai sigg. professori Schlick di Kiel e Wieleitner di Augusta, le cui attente critiche mi sono state utilissime.

Berlino, Nikolassee marzo-novembre 1921.

PAOLO KIRCHBERGER

INTRODUZIONE

I

a) **Il problema**

SE le controversie, di qualsiasi natura esse siano, politica, filosofica od altro, riescono raramente a risultati positivi, bene spesso lo si deve al fatto che non se ne è nettamente determinato l'oggetto. Ciascuno dei contradittori potrebbe ammettere le idee del suo avversario pensando forse ch'esse non costituiscono il nocciolo della questione, e quando le due tesi non si urtano in nulla, la loro reciproca confutazione è impossibile e la lotta senza scopo continua senza fine. È dunque molto importante in ogni seria ricerca precisare nettamente e senza ambiguità il punto controverso, la questione centrale attorno alla quale tutto il resto gravita. Formulare e porre con chiarezza un problema è spesso, sia per lo scienzato che per lo studioso, la metà o forse anche la parte piú grande del suo lavoro, poiché alle volte la risposta è piú facile della questione.

D'altra parte la storia ci mostra molti casi in cui il significato, la portata e la fecondità di una conclusione negativa, cioè constatante chiaramente l'impossibilità assoluta di una soluzione della

questione come si era posta nel senso originario, sono state superiori a ciò che una risposta positiva avrebbe potuto dare. Il problema della quadratura del circolo — costruzione di un quadrato della medesima superficie, — o, ciò che è lo stesso, della rettificazione della circonferenza, — costruzione di una retta della stessa lunghezza — ne è un esempio ben noto. Se la soluzione con la riga e col compasso ne è impossibile, la constatazione di questa impossibilità e la sua dimostrazione hanno contribuito al progresso della scienza di piú di quello che avrebbe potuto fare la costruzione ricercata. La storia delle matematiche ci mostra un numero molto considerevole di casi simili, ma nella fisica troviamo l' esempio piú significativo: la constatazione dell' impossibilità del moto perpetuo, cioè dell' esistenza di una macchina che tragga l' energia per il lavoro da se stessa in modo continuo, ha condotto al teorema piú importante di tutte le scienze naturali, quello della conservazione dell' energia. Constatazione e teorema sono logicamente identici, poiché ciascuno di essi si può rigorosamente dedurre dall' altro.

Le condizioni sono le stesse per i problemi dei quali ci stiamo per occupare, quello della legittimità della nozione del movimento assoluto e quello della sua messa in evidenza. Si può definire il movimento di un corpo solamente in modo "relativo," cioè in rapporto ad altri corpi, oppure lo si può fare in modo assoluto, cioè in rapporto allo spazio puro? Un po' di riflessione mostra che un movimento è sempre "relativo," che si rappresenta e si descrive in rapporto ad un corpo di

confronto, considerato come in stato di quiete. Se io passeggio in un treno in moto, oppure se io tolgo dal porta-bagagli le mie valige, il corpo di confronto è naturalmente il vagone, il movimento del treno si effetua in rapporto alla terra considerata come immobile, quello della terra in rapporto al sole, quello del sole in rapporto alle stelle fisse, e lo stato attuale dell'astronomia non ci impedisce affattto di credere ad un movimento d'insieme delle stelle fisse, il quale per poter avere un senso intelligibile dovrebbe veramente supporre altri mondi stellari in quiete per confronto. Non c'è dunque altro che movimento "relativo" in ogni dove e noi diremo: "Si chiama principio della relatività ogni teoria secondo la quale solo la nozione di movimento relativo ha un significato, poiché quella del movimento assoluto non ha alcun senso e ne è impossibile la messa in evidenza." Vedremo che vi sono molti principî di relatività.

b) **Il principio della relatività cinematica**[1]

Eliminiamo a tutta prima i dati delle scienze naturali, quelli della fisica in particolare e limitiamoci a quelli delle sole scienze puramente geometriche, cioè alla rappresentazione dello spazio tale come ce la danno la vista e il tatto: la relatività è allora illimitata. Se, guardando dalla

[1] Sotto il nome "Cinematica" o "Foronomia" s'intende lo studio dei movimenti senza considerare il tempo e le forze (in opposizione alla Meccanica).

finestra io giro la testa a sinistra, nessuna ragione geometrica m' impedisce di considerare questo movimento come semplicemente relativo agli oggetti circostanti. Posso dunque figurarmi che non è la mia testa, ma il mondo intero che si è spostato, i punti lontani piú rapidamente, i punti vicini piú lentamente (se voglio fare intervenire la nozione del tempo) senza trovare in ciò nulla di geometricamente inammissibile, poiché le due teorie conservano egualmente la posizione relativa di tutti i corpi, che è il solo fatto geometricamente percettibile. Io posso naturalmente scegliere un punto qualsiasi come polo in stato di quiete, ed immaginare un adeguato spostamento del resto del mondo, comprendendovi la mia testa. E cosí è, per quanto il movimento possa essere complicato; e se io, per esempio, mi metto a ballare su di un meccanismo in marcia, nulla mi impedisce, dal punto di vista geometrico, di suppormi in quiete e di attribuire i movimenti necessari al resto dell' universo, compresi i corpi celesti piú lontani. Quanto alla verosimiglianza di una simile concezione e alle ragioni che la condannano, esse non dipendono piú dalla geometria.

Il principio della relatività cinematica non è cosí evidente né cosí privo di significato come potrebbe apparire dopo quanto si è detto. Benché non sotto questo nome, esso ha rappresentato nella storia delle scienze una parte importante, sopratutto in quella del sistema del mondo. Gli antichi astronomi e quelli del medio-evo sino allo stesso Copernico, erano ben lontani dalla

concezione fisico-meccanica dei movimenti dei corpi celesti; essi non li immaginavano altro che geometricamente, provandosi solaménte a descriverli e non proponendosi affatto di ricercarne le cause. Da questo punto di vista la relatività era illimitata: un punto qualsiasi dell'universo poteva essere considerato come in stato di quiete, e da questa scelta si deducevano i movimenti degli altri punti, considerati come mobili. Si poteva, per esempio, considerare la terra come fissa: era, com'è noto, il punto di vista del sistema di Tolomeo, che fu per 1500 anni, con la filosofia di Aristotile, il canone intangibile della verità; pure è notevole il fatto che lo stesso Tolomeo, nell'introduzione della sua grande opera, ha accennato alla possibilità di una spiegazione "forse piú semplice" del moto delle stelle per mezzo di quello della terra. Egli dunque intuí il nostro principio della relatività dei moti. Non sono delle ragioni geometriche, cioè rispondenti alle sue concezioni astronomiche, ma delle ragioni fisico - meccaniche, benché erronee, che l'hanno condotto a negare il movimento della terra e a persistere nel suo sistema.

Anche ai nostri giorni la comprensione di questi problemi sembra presentare delle difficoltà. Ho ancora presente chiaramente un piccolo fatto accaduto in un cerchio di studiosi del quale io facevo parte. Avvenne durante una conferenza sull'astronomo Ticone Brahe, autore, com'è noto, di un sistema cosmico intermedio tra il sistema di Tolomeo e quello di Copernico, e nel quale la terra è supposta immobile, come dal primo fu ri-

tenuto. La critica del conferenziere era assai dura, e noialtri uditori ci sentivamo alquanto superiori a simili anticaglie, poiché ci ritenevamo al sicuro per la nostra superiorità copernicana. Ma un professore, che evidentemente aveva un' idea recondita, entrò nella discussione e pretese che il sistema di Ticone fosse letteralmente esatto e richiese che gliene indicassero uno migliore. Si videro allora tutti i volti pervasi di stupore, e vi furono delle risposte fiacche. La soluzione giusta fu infine data da un giovane studioso, autore in seguito di opere scientifiche stimate. La questione, disse, non può essere risolta con lo studio geometrico del sistema solare, è necessario introdurvi le relazioni col sistema delle stelle fisse, esterno a quello dei pianeti, o considerazioni meccaniche.

In un'opera recentemente apparsa si afferma che le fasi di Venere, scoperte da Galileo, non siano possibili se non nel sistema di Copernico. (Le fasi di Venere, visibili senza strumenti ad occhi buonissimi, sono molto simili a quelle della Luna, ma procedono molto piú lentamente e sono accompagnate da una sensibile variazione della grandezza totale del disco). Sarebbe piú esatto il dire: la formazione di ombre, come quelle che creano le fasi di Venere e della Luna, è un fenomeno puramente geometrico, la cui spiegazione, assolutamente indipendente dal punto considerato come in quiete, è altrettanto buona nei sistemi di Tolomeo o di Ticone, come in quello di Copernico, secondo il nostro principio della relatività cinematica. Infine notiamo che gli "Annuarî Astronomici" o "Nautici," destinati agli

usi pratici dell' astronomia o della navigazione, descrivono i movimenti degli astri tali quali appaiono dalla terra considerata come centro immobile; val dire che in questi scopi unicamente di utilità, il sistema geocentrico è ancora valevole; astronomi e navigatori lo utilizzano sempre.

c) **Il principio della relatività meccanica**

Se geometricamente tutte le spiegazioni di un movimento possono essere considerate come equivalenti, l' esperienza quotidiana ci dimostra che in realtà non è cosí. In un treno in marcia, o meglio ancora in un ascensore che scorre con un movimento uniforme, con una dolcezza perfetta, noi, certo, non avvertiamo il movimento, ma ci accorgiamo della messa in marcia o dell' arresto. In un tram o in un qualsiasi altro veicolo, anche senza guardare al di fuori, per le ben note perturbazioni di equilibrio, siamo avvertiti del passaggio delle curve affatto intuitivamente, senza riportarci a un corpo di paragone, cioè in una maniera non solamente relativa, ma anche assoluta. Un fisico armato di tutti gli apparecchi immaginabili, non ci darebbe maggiori indizi di quelli che ci dà la nostra sensazione immediata: s' egli non potesse gettare uno sguardo fuori del treno non sarebbe in grado, per qualche esperienza ch' egli tentasse, di mettere in evidenza dall' interno del veicolo in marcia il movimento uniforme del veicolo stesso; al contrario egli consta-

terebbe senza difficoltà e senza aver bisogno di corpi di raffronto ogni cambiamento di velocità e di direzione. Per negare quindi ogni significato alla nozione del movimento assoluto, non accordandolo se non a quella del movimento relativo, due restrizioni sono necessarie: il movimento si deve fare in linea retta e con una velocità costante; secondo l'espressione ormai consacrata, esso deve essere rettilineo ed uniforme. Il principio di relatività meccanica esprime l'idea della significazione puramente relativa di questo movimento, questa volta senza limitazione dei modi d'osservazione; noi l'enuncieremo: "I movimenti rettilinei e uniformi non esercitano alcuna azione che li riveli; essi non sono quindi percettibili, possiamo figurarceli a volontà, come effettuantisi in un senso o nell'altro senza mutare neppure minimamente le condizioni fisiche osservabili." Se, per esempio, qualcuno pretendesse che tutto il nostro universo siderale, i suoi milioni di stelle, i suoi ammassi stellari, le sue nebulose, volino con una inconcepibile velocità attraverso lo spazio supposto vuoto e non contenente altro, gli si potrebbe domandare in che cosa questa ipotesi differisca dal suo inverso: decidere se essa abbia qualche senso dal punto di vista filosofico non è nostro cómpito; ma dal punto di vista scientifico essa ne ha cosí poco, come il supposto contrario che farebbe muovere lo spazio vuoto rispetto a noi.

Si vede facilmente che il principio di relatività meccanica è identico a quello dell'inerzia, secondo

il quale un corpo conserva lo stesso stato di movimento proprio, sino a che una "forza" non lo costringa a cambiarlo. Infatti se non ci fosse l'inerzia, gli oggetti posti alla superficie della terra o nel treno in marcia, non potrebbero continuare a muoversi, cioè a restare in quiete "relativamente" alla terra o al treno. Essi si comporterebbero differentemente rispetto ai corpi di raffronto, secondo che questi fossero mobili o meno; si potrebbe scoprire il movimento in se stesso, e non vi sarebbe il principio di relatività meccanica.

Si può affermare che pochi teoremi hanno dato tanto da pensare alla umanità per la loro completa intelligenza. Tolomeo, come abbiamo visto, sembra abbia avuto l'intuizione della relatività dei moti, ma si è arenato dinanzi al principio meccanico. Galileo ne è il padre, l'ha perseguito sino alle ultime applicazioni e non si è mai ingannato nell'usarla? La questione rimane insoluta. Forse fu Newton che per il primo la trattò a fondo, traendone le ultime conseguenze, ma in ogni caso Galileo, prima di ogni altro, ne ha dato un'esposizione chiara, ne ha riconosciuto tutta la portata, l'ha discusso esaurientemente e ne ha fatto, con la vivacità e con la passione che distingueva cosí grande uomo, un mezzo popolare di spiegazione. Nella sua discussione sui due sistemi del mondo, che si può leggere anche oggi con interesse, egli spiega con una grande chiarezza e secondo le nostre concezioni attuali, che per il principio dell'inerzia, tutti i fenomeni accadono sulla terra in movimento perfettamente eguali a

quelli che accadrebbero sulla terra in stato di quiete, e che quindi, non si può, dai fenomeni osservati su di essa, concludere nei riguardi del suo stato di quiete o del suo movimento. Ed è cosí che, a buon diritto, questo teorema, porta il suo nome.

Ma una osservazione s' impone: il movimento della terra non è né rettilineo né uniforme. Essa descrive attorno al sole una traiettoria quasi circolare e ruota attorno al suo asse. Tuttavia, per l' enorme grandezza del loro raggio, i piccoli elementi di questi due movimenti, che soli possono essere presi in considerazione a causa delle corte durate e della limitata estensione geografica della maggior parte delle esperienze, si possono considerare come rettilinei. Con tutto ciò si potrà scoprire il movimento della terra se, in seguito allo sviluppo nel tempo o nello spazio di una esperienza o di un fenomeno naturale, l' allontanamento dal moto rettilineo ed uniforme diventa apprezzabile. Attualmente si conosce un certo numero di questi fenomeni; deviazione verso l' est di un vento che soffia dall' equatore verso il polo nord (poiché la componente della sua velocità diretta verso est rimane superiore a quella delle regioni al di sopra delle quali passa), o quella di un corpo cadente da una grande altezza, rotazione del piano di oscillazione di un pendolo (pendolo di Foucault) al termine di un tempo sufficientemente lungo.

Passiamo ora al caso particolarmente importante di un fenomeno che si svolge su di un corpo in movimento, o, secondo l' espressione abituale, in un " sistema in movimento " e seguiamolo si-

multaneamente dal sistema stesso e dal suo esterno. Supponiamo, per prendere un esempio semplice, dei fanciulli che giocano a palla su di una nave che rasenta la costa, e osserviamo la palla, la sua velocità in particolare, prima dal ponte, poi dalla riva. La nave è il nostro "sistema in movimento." Visto dal ponte, il gioco si svolge esattamente come sulla terra ferma; la velocità della palla relativamente alla nave è, nei due sensi, la sua velocità ordinaria, quella che avrebbe sulla terra. Ma, visto dalla riva, il movimento è piú rapido quando la palla è lanciata verso l'avanti; perché alla velocità del battello, che anch'essa possiede, si aggiunge la velocità propria della palla stessa. Quando questa è lanciata verso l'indietro è necessario che noi consideriamo che dalla sua "velocità propria" vien tolta quella del battello (o inversamente secondo le loro grandezze relative), di modo che se, per esempio, tutte e due (velocità propria e velocità del sistema) sono per caso eguali ma di senso opposto, la velocità della palla, vista dalla terra, è nulla rispetto ad essa. Se, invece, il gioco ha luogo sulla riva, il movimento della palla nel senso della marcia appare rallentato quando lo si osserva dalla nave, poiché dalla sua velocità propria bisogna togliere quella della nave, mentre che il movimento della palla nel senso opposto sembra, naturalmente, accelerato di altrettanto.

Immaginiamo che la nostra nave, supposta disalberata, scompaia dietro una diga e che non si possa piú vedere altro che le palle andare e venire, o anche la parte superiore di un passeggero

che va su e giú sul ponte; evidentemente, dalla differenza delle velocità nei due sensi ci sarà possibile desumere la velocità del battello. Tentiamo di dare a queste osservazioni una forma astratta, e a bella prima non consideriamo che il movimento nel senso della marcia del battello: "La velocità di uno spostamento che si effettua in un sistema in movimento è uguale, se la si considera dal sistema in quiete, alla somma della velocità del sistema e della velocità propria dello spostamento," e inversamente:

"La velocità di uno spostamento che si effettua in un sistema in quiete è uguale, se la si considera da un sistema in movimento, alla differenza tra la velocità propria e la velocità del sistema." Dato il loro oggetto, queste proposizioni sono chiamate teorema d'addizione delle velocità di Galileo. Se noi ci riportiamo al nostro precedente enunciato del principio di relatività meccanica di Galileo, noi aggiungeremo che questo teorema ne costituisce l'essenziale.

d) **Una questione importante**

In condizioni analoghe, altre esperienze differenti da quelle della palla lanciata sul battello in movimento, possono condurre a risultati differenti. Supponiamo che da dietro il bastimento in marcia venga lanciato un segnale sonoro, un colpo di pistola per esempio, e cerchiamo la ve-

locità del suono relativamente alla nave ed alla riva. Il risultato è ben differente da quello precedente: il suono, sia che lo si produca sul battello, sia sul suolo, si propaga in rapporto alla terra ferma con la stessa velocità, circa 333 metri al secondo. Ma si trova un numero piú basso se la misura si fa dalla nave e in rapporto ad essa: sarà per esempio 313 metri se il battello avanza di 20 metri al secondo; se lo stesso progredisse di piú di 333 metri al secondo, il suono generato all' indietro non potrebbe mai raggiungerlo, cosí come il Barone di Münchhausen a cavallo della sua trasvolante palla, non potrà mai udire il colpo del cannone che l' ha lanciato nell' aria. A prima vista sembra vi sia contraddizione col principio di relatività: non possiamo noi, senza aiuto esteriore, determinare la velocità del battello restando su di esso? Non è sufficiente misurare la velocità del suono sul ponte e togliere da essa la velocità normale di 333 metri al secondo? Un po' di riflessione ci mostra che la contraddizione non è che apparente, poiché è nell' aria che si propaga il suono e quello che noi misuriamo non è la "velocità assoluta" della nave, ma la sua velocità in rapporto all' aria. Se, per semplificare, noi supponiamo il vento nullo, noi possiamo dire con la formola già impiegata: La propagazione del suono, anche quando viene prodotto nel sistema in movimento, si fa nel sistema in quiete; noi osserviamo semplicemente un fenomeno del primo nel secondo; possiamo applicare la seconda espressione del nostro teorema d' addizione delle velocità; il principio

di relatività non è in difetto; dobbiamo solamente risolverci a considerare l'aria come un sistema allo stesso titolo dei precedenti.

Ma questo studio della propagazione del suono ci conduce a porre un problema la cui importanza è divenuta straordinaria, quello della propagazione della luce nei sistemi in movimento. Dobbiamo credere ch'essa sia relativa al sistema mobile, come il lancio della palla? O relativa al sistema in quiete come per il suono? E a quale sistema in quiete? Per il suono è l'aria che ne è il mezzo di propagazione: qual'è dunque questo mezzo per la luce? Poniamo questa questione senza alcuna idea preconcetta; si risponderà: la luce si propaga nell'etere. Ma che cos'è questo etere? L'esistenza dell'aria, in seno alla quale si propaga il suono, ci è dimostrata senz'altro dall'azione del vento, per esempio; noi la conosciamo senza possibile dubbio, grazie alla fisica ed alla chimica. Al contrario, dell'etere non sappiamo affatto nulla; la stessa astronomia non offre la benché minima ragione d'essere ad un elemento universalmente diffuso nello spazio; in particolare non sembra ch'esso, se esiste, influenzi in nulla i movimenti dei corpi celesti; forzando un po' le nostre espressioni, pare che l'etere non abbia altra funzione nell'universo intero che quella di dare una spiegazione puramente verbale della propagazione della luce nello spazio. Le questioni precedenti diventano quindi piú interessanti: in fatto non è possibile prevedere alcun che della loro soluzione; l'esperienza solamente ci darà la risposta.

LA RELATIVITÀ PARTICOLARE

II

I NUOVI FATTI

a) **Esperienza di Fizeau**

L' importanza dei problemi davanti ai quali ci troviamo non ha altra cosa di eguale che la loro enorme difficoltà. La sola questione della determinazione della velocità della luce, sia nei sistemi in quiete che in quelli in movimento, esige una straordinaria sagacità nella discussione delle esperienze, unita ad una precisione grandissima e alle piú minuziose precauzioni nella loro esecuzione. Differenti metodi, assolutamente indipendenti, astronomici o fisici, hanno permesso di determinare questa velocità con una meravigliosa approssimazione; si sa che essa è di circa 300.000 chilometri al secondo e che in conseguenza la luce va da Colonia a Koenigsberg (o da Taranto a Torino) in $^1/_{300}$ di secondo, ch' essa percorre il diametro della terra in meno di $^1/_{20}$ di secondo, e si propaga dalla terra alla luna in meno di 1 secondo e $^1/_2$. A prima vista sembra impossibile constatare e misurare l' influenza che possono avere su questa enorma velocità le velocità ter-

restri, tanto deboli a paragone, dato che quella del piú rapido proiettile raggiunge appena 1 chilometro al secondo all' uscita della canna, per diminuire in seguito rapidamente.

In pratica non si sarebbe potuto trovare la soluzione di questo problema sperimentale se non si avesse avuto un metodo estremamente sensibile, quello delle interferenze, il quale permette non delle misure assolute ma dei paragoni di velocità. È noto che la luce è formata di onde prodigiosamente piccole; ve ne sono circa 2000 in un millimetro, un po' piú o un po' meno a seconda del colore; e benché noi non possiamo rappresentarci il suo meccanismo in se stesso e quello della sua propagazione, sappiamo però ch' esso ha tutte le proprietà di un movimento ondulatorio; nel caso particolare, due raggi luminosi si rinforzano quando vi è coincidenza tra i massimi e tra i minimi delle loro onde rispettive da una parte e dall' altra. Essi si neutralizzano e producono oscurità quando i massimi delle onde dell' uno coincidono con i minimi delle onde dell' altro. Se, per mezzo di procedimenti ottici, molto semplici del resto, si divide un fascio luminoso in due raggi, ai quali si fanno percorrere tratti paralleli, e poi li si riunisce nuovamente, si osserverà il primo dei due sopraccennati fenomeni nel caso la lunghezza dei tratti percorsi dai due raggi sia esattamente eguale: i due raggi si rafforzeranno e la luce che ne risulterà sarà altrettanto intensa di quella che si sarebbe ottenuto se il fascio luminoso non fosse stato diviso in due. Ma se ritardiamo uno dei raggi con un leggeris-

simo allungamento del suo percorso, per esempio, lasciando l'altro invariabile, la coincidenza non avverrà piú fra i massimi da una parte, tra i minimi dall'altra, l'allungamento potrà essere tale che i massimi dell'uno coincidano con i minimi dell'altro e si avrà perciò oscurità; è il fenomeno delle "interferenze." Diciamo una parola intorno alla sensibilità di questa esperienza: dato il valore enorme della velocità della luce e dell'estrema piccolezza di un'onda, si vede facilmente che la durata di una vibrazione è incredibilmente corta; infatti ce ne sono parecchie centinaia di trilioni in un secondo; ora, se il tempo che impiega la luce a superare uno dei percorsi non comuni, varia solamente di un millesimo di trilionesimo di secondo (1 diviso 1 seguito da 15 zeri), il metodo è cosí sensibile che permette di scoprire questa variazione. Naturalmente non bisogna vedere nelle indicazioni su riferite altro che un grossolano abbozzo del procedimento usato.

Appunto mediante questo metodo il celebre fisico francese Fizeau tentò nel 1851 di determinare l'influenza del movimento del mezzo sulla velocità della luce. Egli faceva passare in un tubo una corrente d'aria o d'acqua e paragonava le velocità nel senso della corrente, in senso inverso e senza corrente. Non ci occuperemo dei risultati ottenuti con l'acqua, nella quale il valore trovato è del resto, nelle condizioni normali, affatto differente da quello che ha nell'aria; ma per quest'ultima l'esperienza ha dimostrato con la piú grande precisione che il suo movimento non

ha la benché minima influenza sulla propagazione della luce. Sia che si propaghi nell'aria in calma, sia nella direzione della sua corrente o in senso inverso, la luce non va né piú veloce né piú lentamente di un millesimo di un trilionesimo di secondo; sembra che essa non sia influenzata in nulla dai movimenti del mezzo nel quale si propaga. Riportiamoci agli esempi del gioco della palla e della propagazione del suono sulla nave in marcia. La luce non si comporta come la palla che partecipa al movimento del battello e che, in conseguenza, vista dalla costa, sembra spostarsi piú velocemente quando si muove nel medesimo senso del battello, piú lentamente se si sposta in senso inverso. Essa si comporta piuttosto come il suono, che non partecipa in nulla al movimento del battello sul quale lo si produce, e si propaga con la stessa velocità verso l'avanti o verso l'indietro per l'osservatore posto sulla riva. Secondo la formola abituale: "Se da un sistema in quiete, consideriamo la propagazione della luce in un sistema in movimento, constatiamo che detta propagazione è in esso assolutamente estranea e avviene nel sistema in quiete."

b) **L' esperienza di Michelson**

Il risultato dell'esperienza di Fizeau pone naturalmente un nuovo problema, quello della propagazione della luce nel mezzo in movimento per un osservatore facente parte di questo mezzo. Ci

si doveva attendere di constatare un' azione corrispondente a quella trovata per il suono allorché si riferisce il suo movimento non piú alla riva, ma alla nave in marcia. Immaginiamo dunque un osservatore che accompagni l' aria nel tubo di Fizeau e cosí piccolo che non possa vederne le pareti. Non potendo egli riferire ad esse il suo movimento e in conseguenza metterlo in evidenza, poiché tutto l' universo che può conoscere si muove con lui nella corrente d' aria, egli si considererà come in quiete. Supponiamo ch' egli determini la velocità della luce attraverso la sua atmosfera; per un raggio, il fatto di avere oppur no raggiunto un punto determinato ad un dato istante è, senza dubbio alcuno, assolutamente obiettivo e non può essere interpretato in modo differente, quali che siano la posizione e il movimento dell' osservatore. Ora, poiché detto osservatore si sposta contemporaneamente alla propagazione della luce, egli determinerà senza dubbio (questa conseguenza sembra inevitabile) nella sua propria direzione, ch' egli d' altra parte ancora non suppone, una velocità della luce piú debole che nella direzione opposta o in una direzione laterale. In conseguenza egli potrà definire la velocità della luce in grandezza e in direzione, aggiungiamo per essere esatti, "relativamente" al sistema nel quale si propaga la luce stessa.

Non abbiamo l' intenzione di esporre particolarmente l' esperienza del Michelson; essa presume a tutta prima alcune cognizioni matematiche molto semplici del resto, e per di piú è stata sufficientemente descritta in opere di volgarizzazione

nelle quali il lettore curioso può ritrovarla. Notiamo semplicemente una difficoltà: le estremità dei percorsi luminosi di due raggi sorti da una stessa sorgente, l'uno nel senso della corrente d'aria, l'altro in senso inverso, non coincidono, mentre che il metodo interferenziale ha bisogno della riunione dei due fasci separati. Si è tuttavia arrivati a sormontare questo ostacolo per mezzo di una disposizione geometrica molto ingegnosa, disgraziatamente però a detrimento della grandezza dell'effetto da constatare. Perché esso fosse ancora misurabile bisognava trovare un movimento del mezzo ben piú rapido di quello di cui si disponeva nell'esperienza di Fizeau; il piú rapido possibile era quello della terra sulla sua orbita, 30 chilometri al secondo circa, appena la $^1/_{10.000}$ parte della velocità della luce.

È dunque questo movimento che il Michelson ha scelto, e del resto l'interesse particolare che gli si annette l'avrebbe imposto anche senza questa ragione. Si trattava dunque di sapere se, per l'osservatore trasportato dalla terra, la luce si propaghi nel senso del movimento piú rapidamente che nel senso inverso e di misurare la differenza. La straordinaria importanza della risposta, anche per l'astronomia, salta agli occhi. Noi infatti conosciamo il movimento della terra intorno al sole, ma non abbiamo che delle nozioni incomplete di quello del sole rispetto alle stelle fisse, cioè a dire nell'universo, e, dato lo stato attuale dell'astronomia, dovremo forse continuare le nostre osservazioni ancora per dei secoli prima di poter risolvere questo problema in

una maniera, se non soddisfacente, almeno piú soddisfacente che oggi; ora, l'esperienza del Michelson sembrava offrire la possibilità di ottenere di un sol tratto la soluzione di una questione tanto importante e tanto ardua, e giustificava per questo il lusso straordinario e la cura minuziosa con i quali la si è tentata.

A rigor di termini non si sarebbe potuto considerarne il successo come una confutazione del principio di relatività. Nell'esempio che noi abbiamo parecchie volte ricordato, abbiamo misurato non la velocità assoluta della nave, ma la sua velocità in rapporto al sistema nel quale si propaga il suono: l'aria. Parimenti l'esperienza del Michelson non avrebbe fatto conoscere il movimento assoluto della terra, ma la sua velocità relativa al sistema nel quale si propaga la luce, l'etere. Non sarebbe stata, è vero, altro che una concezione puramente teorica, una formola destinata a salvare il principio ad ogni costo. L'etere, considerato come l'ipotesi indispensabile per la propagazione della luce, riempe l'universo intero che i nostri sensi percepiscono alle piú lontane profondità siderali. Filosoficamente si può ammettere che un movimento in rapporto all'etere si distingue da un movimento in rapporto allo spazio vuoto: dal punto di vista pratico, fisico e sperimentale, tal distinzione non ha senso. La riuscita dell'esperienza non avrebbe dunque permesso che un salvataggio platonico della relatività.

Ma i risultati delle prime prove nel 1881, e del tentativo ripreso con maggior precisione nel 1887 furono assolutamente negativi. Col suo apparec-

chio tanto perfetto, Michelson confrontò la velocità della luce in tutte le direzioni possibili senza trovare la benché minima differenza. Ricominciò in altre stagioni, quando cioè l'orientamento del movimento terrestre in rapporto alle stelle fisse era cambiato, ma invano. Non vi era quindi da dubitare del movimento della terra intorno al sole! Bisognava concludere che tale movimento fosse in qualche modo neutralizzato da un movimento d'insieme del sole e di tutto il suo sistema planetario di velocità esattamente uguale, ma di senso contrario, il che avrebbe lasciato la terra in quiete in rapporto alle stelle fisse? Ma questa circostanza non poteva verificarsi che per una sola posizione della terra sulla sua orbita e non spiegava la non riuscita dell'esperienza in differenti epoche dell'anno. Infine notiamo che la precisione era tale che, anche se l'effetto prodotto non fosse stato che il $^1/_{100}$ dell'effetto calcolato, non avrebbe potuto passare inosservato.

Riassumendo, riprendendo la nostra formola ordinaria, potremo dire: "Se da un sistema in movimento misuriamo la velocità con la quale vi si propaga la luce, noi constatiamo che questa propagazione avviene in questo sistema."

c) **Confronto**

Se confrontiamo i risultati delle due esperienze la contraddizione appare evidente. Ma prima dobbiamo rispondere ad un'obiezione possibile e

spesso enunciata: le condizioni non sono rigorosamente le stesse nei due casi; nell' uno la sorgente luminosa si trova nel sistema fisso, e dall' esterno essa invia nel tubo un raggio luminoso che non prende nessuna parte al movimento del mezzo; nell' altro partecipa a questo movimento; poiché la luce non penetra dal di fuori nel sistema mobile, che costituisce la terra intera, essendo in esso prodotta. Per operare in condizioni identiche si potrebbe pensare ad utilizzare la luce delle stelle che proviene da una sorgente certamente esterna, se essa non fosse troppo debole per delle misure cosí delicate. Quanto a quella del sole essa avrebbe un altro inconveniente: essa non può agire che nella sola direzione perpendicolare alla traiettoria, mentre che nell' esperienza di Fizeau vi è coincidenza nelle direzioni dei movimenti della luce e del sistema (corrente d' aria).

Fortunatamente questo scrupolo è superfluo; non si può ammettere che il movimento della sorgente luminosa abbia un' influenza qualsiasi sulla propagazione della luce; sarebbe molto difficile spiegare teoricamente questa influenza, poiché, sopratutto dopo Faraday, ci si è sempre di piú convinti ch' era necessario rinunziare alle azioni a distanza, tra le altre nei fenomeni elettrici ed elettro-magnetici dei quali la luce è un caso particolare, e rimpiazzarle unicamente con azioni ravvicinate. Ciò che causa l' azione della luce in un tratto del suo tragitto non è la sorgente, forse lontanissima, ma lo stato del raggio nel tratto immediatamente anteriore. Per essere differente in un elemento, bisognerebbe che il fe-

nomeno lo fosse già nell'elemento precedente: si vede che sarebbe malagevole rappresentarsi il fatto. D'altra parte, per il suono lo stato di movimento o di quiete della sorgente non ha la benché minima influenza sulla sua velocità e si potrebbe da ciò concludere per analogia, ma naturalmente, solo l'esperienza è quella che ci può risolvere; ora in astronomia in particolare, essa ci mostra che, qualunque sia il movimento della sorgente luminosa, non si ha alcuna azione sulla velocità della luce.

La contraddizione tra le due esperienze fondamentali è quindi completa: un raffronto la renderà piú sensibile. Noi siamo sulla riva di un fiume e dei treni vi circolano nei due sensi con la stessa velocità. Supponiamo ora che questo andirivieni abbia luogo su di una zattera; se l'osservatore constata dalla riva che la velocità è rimasta la stessa nelle due direzioni penserà che la zattera è all'àncora, che è immobile. Lasciandosi andare secondo la corrente su di un canotto egli deve quindi attendersi di vedere i treni, che vengono verso di lui, passare alla sua altezza con una velocità superiore a quella dei treni che lo raggiungono, e se, al contrario, le velocità degli uni e degli altri gli appaiono eguali, ne dedurrà che la zattera discende il fiume come fa egli stesso. L'esperienza del Fizeau ci conduce a concludere, come l'osservatore sulla riva, che la zattera è fissa; quella del Michelson ci fa pensare, alla stessa maniera dell'osservatore sul canotto, ch'essa cioè segua la corrente: qualunque sia il movimento dell'osservatore, la zattera, che sim-

bolizza l'etere ipotetico, è in quiete rispetto a lui. Potremo allora dire: L'esperienza del Fizeau dimostra che nel movimento di un mezzo qualsiasi l'etere rimane in quiete, che esso non è trascinato; quella del Michelson dimostra che l'etere è trascinato. D'altra parte non è che una espressione piú grossolana del nostro primo enunciato sulla velocità della luce nei sistemi in quiete e in movimento. Prendiamo un secondo esempio; nell'istante in cui parte un treno lungo centinaia di migliaia di chilometri, dall'ultimo vagone vien lanciato un segnale luminoso. Dopo quello che abbiamo visto è indifferente che questo lancio si faccia sul vagone, sul suo tetto o sulla sua predella, o sul suolo. Misuriamo quindi la velocità della luce sulla via e sul treno, cioè determiniamo il punto dove essa sarà giunta al termine di un secondo; sulla strada noi troveremo naturalmente una distanza di 300.000 chilometri, ma sul treno, sulla predella per esempio, noi ritroveremo la stessa velocità, e pur tuttavia mentre la luce si propagava il treno avanzava!

In qualsiasi modo si possa considerare questo fatto, sembra certo che la velocità del sistema non si può né aggiungere né togliere alla velocità della luce; non si può quindi applicare a questo nostro ultimo teorema l'addizione della pag. 18: "il principio di relatività di Galileo, di cui questo teorema costituisce la base, non è valevole per la propagazione della luce; esso dunque non è assolutamente generale."

Ma questa costatazione puramente negativa non

chiarisce la contraddizione dei fatti sperimentali che esigono imperiosamente uno studio piú completo. In base a ciò che già sappiamo la contraddizione è cosí manifesta, i fatti che la generano cosí semplici, che non si può pensare a scartarla con delle mezze misure dalle quali non si può ricavar nulla. Per arrivare alla spiegazione di essa, semplice e netta, quale da noi si desidera, ci è necessario trasformare profondamente, e non senza fatica, le vecchie abitudini del pensiero. Si è potuto per anni interi contentarsi dei fatti, non considerandoli altro che in se stessi, rinunciando a dominarli con un lavoro di sintesi ed ordinarli in una teoria qualunque; questo comodo procedimento non poteva alla lunga essere la via della scienza.

III

LA SPIEGAZIONE DI LORENTZ

a) **La teoria**

Si sarebbe tentati di dire che la prudenza è la migliore delle prodezze quando si vede scorrere una ventina d'anni senza che una seria prova sia stata fatta per rimuovere la difficoltà. Trattati e conferenze sull'ottica si limitavano a qualche breve e vago cenno sulla propagazione della luce nei mezzi in movimento. Veniva citata appena l'esperienza del Michelson, che oggi è forse la piú

celebre della fisica. Quando avvenne un fatto straordinario: il fisico olandese H. A. Lorentz, già molto conosciuto, si soffermò dinanzi a questo problema, e, senza contentarsi di darvi il primo impulso, ne tentò la soluzione con una vastità di vedute ed un' audacia non comuni.

Un esempio ci mostrerà le grandi linee del suo pensiero che matematicamente non è di un'assoluta irreprensibilità, come il lettore attento forse noterà, ma permette di spiegare l' essenziale sotto una forma figurata e facile a comprendersi, e per noi questa è la cosa principale. Ritorniamo al nostro treno in marcia e al segnale luminoso lanciato dal vagone di coda. Lorentz suppone che, per l' effetto stesso del suo movimento, il treno subisce un accorciamento, una contrazione, il che avviene per ogni oggetto mobile; questa contrazione del resto non può essere che molto lieve, come vedremo; ma in ogni caso, essa non è percettibile e osservabile che dal suolo e non dal treno. Se noi collochiamo nel treno in movimento o sul suo predellino il regolo per misurare il treno stesso, si vede che il regolo e il treno, partecipando allo stesso movimento, si accorciano simultaneamente e quindi il regolo resta contenuto nella lunghezza del treno lo stesso numero di volte, quante lo sarebbe se detta misurazione avvenisse nel treno in quiete. Il numero di volte che si riporta un regolo su di un tratto viene da noi chiamato lunghezza di questo, e naturalmente per il loro simultaneo accorciamento, lunghezza e regolo rimangono rispettivamente invariati. Supponiamo ora che il nostro treno abbia 300.000

chilometri di lunghezza. Al termine esatto di un secondo, il segnale luminoso raggiunge il punto dov'era la locomotiva, il che per un viaggiatore dà un percorso di 300.000 chilometri, perché gli è stato necessario riportare 300 milioni di volte il suo metro. Al contrario l'osservatore rimasto a terra, il cui regolo non ha per nulla variato, constata l'errore in cui il viaggiatore è caduto e pel quale il treno non è di 300.000 chilometri, ma si è raccorciato. Egli nota anche che, nel secondo in questione, la luce ha percorso in piú la distanza di cui si è spostato l'ultimo vagone e che il viaggiatore, naturalmente, non ha notato. Aggiungendo tale distanza alla lunghezza del treno raccorciato egli ritrova i 300.000 chilometri della velocità della luce.

Dunque secondo Lorentz: "Tutti gli oggetti in movimento si contraggono nella direzione del loro movimento, ma non ce ne accorgiamo perché si adoperano strumenti di misura che sono soggetti allo stesso fenomeno."

È un'ipotesi di un'audacia sorprendente: per dimagrire basterebbe quindi fare molto movimento! La sola disgrazia sarebbe di non poter constatare il cambiamento! È appena necessario notare che l'importanza di questo accorciamento dipende dalla velocità, e che esso è tanto piú grande, quanto piú quella è considerevole, ma i movimenti conosciuti sono di una tale lentezza, in confronto alla enorme velocità della luce, che la variazione è incredibilmente debole. La stessa madre Terra, con la sua rispettabile velocità di

30 chilometri al secondo, non diminuirebbe lungo il suo diametro di 12.000, 13.000 chilometri, che di circa 6,5 cm.; si vede ciò che sarebbe per un uomo la cui velocità è 15,000 volte piú debole di quella della terra. (vedi cap. VI).

b) **Critica**

Nonostante l'ammirazione che ispirano l'audacia e la logica della concezione di Lorentz, non ci si può sottrarre, nello studiarla, da una certa perplessità che un piú preciso esame non fa che aumentare. L'ipotesi, a prima vista, assai strana di un cambiamento di volume per il solo effetto del movimento, non può essere che una difesa contro il brutale disaccordo che noi abbiamo esposto. È spiacevole che una teoria fisica di tale importanza non permetta, per la sua natura tutti i tentativi di verifica o di confutazione, perché questi sono resi impossibili dalla contrazione simultanea del regolo di raffronto. Ciò ricorda, se ci si permette un paragone non gradevole ma chiaro, il famoso bambino prodigio che ad un anno leggeva alla perfezione; disgraziatamente egli non sapeva né pronunciare né scrivere nemmeno una parola, cosí che i presenti, stupiti, non avevano alcun mezzo per constatare le sue capacità; non vi è dubbio che alla loro piacevole ammirazione fosse unita una certa pena.

Ma ecco il punto piú spinoso della teoria del Lorentz. Supponiamo che un fisico osservi il treno che passa davanti a lui, ch'egli metta in

evidenza il suo accorciamento e sia lieto ch' esso non subisca questa contrazione. Poi, non contentandosi piú della fisica, si lancia nell' astronomia, studia il sistema di Copernico, constata forse che il movimento della terra (o meglio la resultante dei due movimenti della terra) e quello del treno si neutralizzano. Il treno che gli sembrava in movimento è dunque fermo, ed è egli stesso che si muove; è quindi il treno che conserva la sua lunghezza naturale, mentre invece la terra intera e lui stesso si contraggono. Se il nostro amico continua i suoi studi astronomici, forse un giorno si accorgerà del movimento del sole e di tutto il suo séguito di pianeti attraverso lo spazio sidereo; la questione si presenterà ancora in una maniera differente: forse, si risolverà in senso inverso. Benché le nostre attuali cognizioni astronomiche si fermino a questo punto, nessuno ci può impedire di spingerci piú oltre e di concepire dei sistemi sempre piú vasti.

Il nostro proprio stato di contrazione dipenderebbe dunque dalla soluzione dei problemi relativi a degli oggetti estremamente lontani, insolubili con i metodi fisici. A ciò Lorentz poteva ribattere che i cambiamenti ora accennati hanno realmente un significato fisico, sono cioè cambiamenti dello stato di movimento del sistema considerato in rapporto all' etere. Questo etere, è per dirla col Lorentz, l' armatura di tutto l' universo. Ma non si conosce nemmeno una proprietà di questo etere, se ne ignorano i suoi limiti cosmici, la sua stessa esistenza quando è dimostrata da un' esperienza, questa è contestata: se quel-

la del Michelson almeno avesse avuto un risultato positivo, si sarebbe potuto vedere in essa una specie di prova di questa esistenza.

Piú uno vi riflette, piú si persuade che in ogni dove noi non vediamo se non dei movimenti relativi, solo i nostri dati, di cui abbiamo immediata conoscenza possono unicamente essere da noi seguiti sperimentalmente, e sono questi dati reali che la scienza nel suo cammino empirico deve prendere come elementi di questa teoria.

Era dunque naturale che la teoria del Lorentz perdesse rapidamente terreno, quando A. Einstein, con la sua spiegazione geniale, permise di nuovo una concezione puramente relativista, della quale non si sperava ormai piú la possibilità.

IV

LA RELATIVITÀ DELLO SPAZIO SECONDO EINSTEIN

a) **La nuova spiegazione**

Il carattere piú saliente dell' opera di Einstein è, forse, quello di fondare con grande prudenza la teoria del Lorentz su basi assolutamente nuove, di conservarne tutti i particolari utili e, sopratutto, la piú gran parte dello sviluppo matematico. In compenso, ciò che Lorentz considerava come un fenomeno fisico, Einstein lo spiega semplicemente per mezzo di considerazioni filosofiche o matema-

tiche, che fanno sparire tutte le discordanze da noi enumerate. Noi cercheremo, appoggiandoci prudentemente su esempi particolari, di dare una idea di questa teoria, nonostante le serie difficoltà che essa presenta per chi non ha familiarità con le astrazioni matematiche.

Ritorniamo al nostro treno in marcia. Lorentz, come abbiamo visto, se lo imagina accorciato, ma Einstein afferma: posso ammettere questo accorciamento solo in quanto esso è materialmente dimostrabile. Dunque: come sarà fatta questa dimostrazione, e sopratutto chi la farà? In ogni caso non l'osservatore trasportato dal treno; poiché, come abbiamo rilevato, in seguito alla contrazione simultanea del suo metro, la contrazione della lunghezza da misurare non gli è percettibile. Essa quindi non esiste se non per chi non partecipa al movimento, per quegli cioè che è rimasto a terra. Secondo la nostra definizione il treno, in marcia e il suolo in quiete costituiscono dei sistemi differenti. Diremo quindi: "L'accorciamento verrà percepito solo nel caso in cui una lunghezza appartenente ad un sistema venga misurata da un altro sistema."

Questa idea appunto ha permesso ad Einstein la sua notevole critica della misura dello spazio. Ci è necessario distinguere, egli dice, nelle misure delle lunghezze, due diverse categorie; nell'una l'operatore e la lunghezza da misurare sono nello stesso sistema, cioè in quiete relativa; nell'altra essi sono in sistemi differenti, cioè la lunghezza si muove in rapporto all'osservatore, o recipro-

camente, il che dal punto relativista è la stessa cosa. Studiamo piú da vicino questi due generi di misure. Naturalmente è la prima che offre minore difficoltà, perché l'osservatore e la lunghezza sono in quiete relativa. Se per esempio domandiamo a qualcuno di misurare la facciata di una casa, qui non vi potrà essere questione di movimento relativo, perché la casa e lui sono nello stesso sistema, quello della terra, considerata come immobile. Con un metro l'operazione è semplicissima: si pone, com'è noto, un capo del metro ad una delle estremità della facciata, si segna il punto dove cade l'altro capo, si ricolloca il metro una seconda volta facendo coincidere la sua origine con questo punto e si continua.

Se alla diciannovesima volta le estremità del metro e della facciata coincidono il risultato della misura è dato dal numero 19.

Nel caso essa non cadesse esatta, si sa come si introducano delle unità piú piccole, i decimetri, centimetri etc, delle quali non parleremo piú oltre. La caratteristica delle operazioni di questa specie è che il concetto del tempo e la sua misura non vi hanno la benché minima parte. Che il nostro uomo faccia il suo lavoro presto o lentamente, ch'egli abbia un orologio esatto o in ritardo, ch'egli l'abbia lasciato a casa, ciò non cambia né il metodo né il risultato.

Proponiamoci invece di misurare la lunghezza del treno in marcia.

Come procedere? Non si potrà certamente mettere accanto ad esso il nostro metro; il treno si sposterebbe durante l'operazione. Non si può

correre lungo il convoglio, poiché fisicamente non vi è differenza tra l'osservatore che corre a fianco del treno e quello che si trova sul suo predellino tutti e due appartenendo al sistema in movimento. Per effettuare la misura, restando sul suolo, ci è necessario segnare, ad un istante determinato, la posizione delle due estremità sulla terra, poi misurare per mezzo del primo metodo la lunghezza cosí ottenuta. Ecco dunque il procedimento: Si collocano lungo la via delle persone munite di orologi rigorosamente esatti, e ad un dato istante, per esempio alle ore 12, si fa loro segnare sulla via, con un tratto di gesso, le posizioni della testa e della coda. Posto che gli orologi dei nostri aiutanti camminino in esatta concordanza, — vedremo tra poco (pag 53) come si arrivi a realizzare questa condizione — e che il nostro personale lavori con tutta la precisione desiderabile, noi otteniamo una lunghezza che possiamo supporre eguale a quella del treno in marcia, e che noi misuriamo secondo il primo procedimento, poiché essa è nel nostro sistema. Noi vediamo che questa maniera di misurazione si differenzia molto dalla prima: essa cioè non può fare in alcun modo a meno del tempo, anzi di piú, ha bisogno di strumenti di misurazione del tempo, degli orologi. La misura nello stesso sistema faceva completamente astrazione del tempo, il che non può accadere quando detta misurazione si fa in un sistema estraneo (e per sistema "estraneo" s'intende quel sistema in movimento relativo rispetto al primo), poiché il concetto di movimento presuppone quello del tempo, senza del quale il

movimento stesso non è concepibile. Il primo modo di misurazione è una semplice questione di geometria, il secondo ne sorpassa sostanzialmente il campo.

Abbiamo dunque due specie di misure. È ben sicuro, domanda Einstein, che con questi due metodi di lavoro, essenzialmente differenti, si trovi lo stesso risultato in tutte le circostanze? Che cosa c' insegna l' esperienza? A tutta prima che il secondo metodo non è per cosí dire mai usato. Se vogliamo misurare la lunghezza di un treno, noi lo facciamo fermare o ci collochiamo sul suo predellino, in altre parole, cerchiamo in una maniera qualsiasi di sopprimere ogni movimento relativo e di collocarci nel suo sistema. Nello stesso modo un carrettiere che vuol misurare il timone di una vettura in moto, si mette alla sua altezza ed opera continuando a camminare. Ma possiamo essere obbligati, trovandoci in un sistema, a misurare una lunghezza di un altro sistema, o a rappresentarcene la misura, e allora il solo metodo possibile è quello che abbiamo or ora indicato.

Checché ne sia ci è necessario confessare che in pratica non si fanno misure della seconda specie. E anche se ne facessimo o ne tentassimo qualcuna, che cosa ne potremmo attendere? Noi sappiamo che tutte le velocità a noi accessibili, anche quella stessa della terra, in confronto a quella della luce, che qui in prima linea c' interessa, sono straordinariamente lente. Esse, tutte indistintamente, hanno delle andature da lumaca. I risultati di esperienze su questi movimenti par-

ticolari non potrebbero essere estesi senz' altro a movimenti generali. Poiché si può pensare a priori, che le differenze possibili tra le due specie di misure siano cosí deboli, per i movimenti lenti, da sfuggire ai nostri metodi piú sensibili, mentre che esse potrebbero avere un' influenza apprezzabile per velocità superiori.

L' esperienza dunque non ci dice nulla circa la concordanza o la non concordanza delle due specie di misure. Ma è un principio ben conosciuto della tecnica delle ricerche fisiche: allorché non si ha su di un punto un' esperienza concludente, e quando non se ne può sperare una, si tenta un' ipotesi piú o meno plausibile, se ne deducono le conseguenze matematiche, poi si vede sino a qual punto esse coincidano con i fatti.

Einstein, usando di tale libertà, ha dato il seguente enunciato:

" Noi ammettiamo che le due misure non concordano, che l' osservatore il quale, dal sistema in quiete vuol misurare una lunghezza del sistema in movimento, la vede accorciata nel rapporto della contrazione del Lorentz." Con questo noi crediamo di aver posto bene in chiaro la nostra osservazione preliminare che Einstein cioè, ha trasportato nel campo matematico e filosofico la concezione puramente fisica di Lorentz della quale però ha conservato una grande parte.

Il grande vantaggio di quella concezione è che essa ristabilisce la relatività. L' accorciamento ch' essa ammette non dipende dalla quiete o dal movimento in se stessi, ma dal movimento della

lunghezza da misurare in rapporto al sistema dell' osservatore. La relazione è dunque la stessa tra il primo e il secondo sistema di quella tra il secondo e il primo. Riprendiamo il nostro esempio: se l' osservatore del treno vuol misurare una lunghezza sul suolo non lo può se non per mezzo del secondo metodo perché il suolo è in movimento rispetto a lui, come lui, in rapporto al suolo. Le relazioni sono dunque reciproche, ed è in ciò appunto una delle basi di tutta la concezione di Einstein; per Lorentz questo non era nulla, perché un accorciamento fisico è qualche cosa di assoluto, e non lo si può supporre dipendente dall' osservatore che lo mette in evidenza. In pratica, Lorentz non può naturalmente fare a meno di collocarsi sul terreno della relatività, ma la sua teoria è assolutista; Einstein ha eliminato questo disaccordo tra la pratica e la teoria.

Senza dubbio si rimprovererà a questa concezione dello spazio di essere un po' troppo astratta e poco chiara e di urtare troppo direttamente, con la sua teoria della discordanza dei due metodi di misure, il senso comune, che esigerebbe categoricamente l' identità dei due risultati. Io non mi lascerò trascinare in una discussione sulla parte che il senso comune deve avere nella scienza, poiché il mio solo scopo è di esporre, secondo il mio meglio, la teoria della relatività e di farla capire al lettore. Ma non vorrei contentarmi di dichiarare ingiustificate o destituite di senso tutte le obiezioni e tutti i dubbi che sono sorti su questioni di cui ciascuno riconosce la difficoltà.

Notiamo nondimeno che, per quanto sia grande nella scienza l'importanza della rappresentazione figurativa, non bisogna sopraelevarne il valore. Senza dubbio è essa che, il piú delle volte, mostra al ricercatore la via di nuovi campi, è essa che dà ali alla sua immaginazione, senza la quale non potrebbe nulla creare; è essa ancora che apre allo studioso la via di nuovi modi di procedere del pensiero. Ma qui la sua funzione si arresta. Non accade mai che essa possa essere l'ultimo criterio del valore o del fondamento di una teoria. Nella lotta tra le rappresentazioni facilmente concepibili da una parte e la logica astratta sostenuta dalla matematica dall'altra, la storia delle scienze ci mostra, attraverso i secoli, il successo costante della logica.

Se tuttavia uno desidera una immagine chiara della teoria di Einstein, la migliore forse è quella spesso usata dal Petzold: quando noi guardiamo un oggetto, l'immagine che ne riceviamo non dipende solo dall'oggetto, ma anche dalla nostra posizione. In qualsiasi posto ci collochiamo non potremo evitare la deformazione di prospettiva; tuttavia, nonostante la diversità delle immagini ottenute, non dubitiamo che esse derivino dallo stesso oggetto. Ora, sino ad oggi, eravamo convinti che in mancanza dell'occhio umano, i metodi di misura fisica potessero cogliere un fenomeno in modo del tutto obiettivo. La concezione di Einstein lo nega e afferma che lo stato di movimento dell'osservatore interviene in tutte le misure, anche in quelle che sembrano le piú obiettive. Esse perciò, tutte indistintamente, danno

immagini deformate, per cosí dire, da una prospettiva particolare. Vi è dietro queste diverse immagini un fenomeno obiettivo che ci resta assolutamente inaccessibile? o sono esse stesse semplicemente l' ultima realtà osservabile? Petzoldt combatte quest' ultimo punto di vista con tutta la sua energia, ma qui dobbiamo contentarci di aver messo sul tappeto la questione.

Queste note non sono né possono essere sufficienti a dare una rappresentazione chiara della teoria della relatività; poiché questa non è suscettibile di essere concretizzata, e da ciò deriva la sua difficoltà. Ma non bisogna in nessuna maniera renderla, per cosí dire, responsabile di tutte queste difficoltà che risiedono piú che altro nei fatti d' esperienza da spiegare. Per togliere la contraddizione apparente delle due esperienze fondamentali bisogna prendere una risoluzione energica: Einstein l' ha presa, e secondo tutte le apparenze, ci è riuscito.

b) **La luce, l' etere,**
le rappresentazioni figurative

Le nostre ultime osservazioni sulle rappresentazioni figurative sono perfettamente illustrate nella scienza dalla storia delle nostre concezioni intorno alla natura della luce. La vecchia teoria di Newton, che la concepisce come una emissione di particelle materiali, era indubbiamente molto rappresentativa. Tant' è ch' essa si sostenne per

lungo tempo, anche dopo che fu contraddetta, senza dubbio alcuno a nostro giudizio, dai fenomeni d'interferenza: dei quali almeno uno era conosciuto dallo stesso Newton. La teoria ondulatoria di Huygens è anch'essa rappresentativa. Se è estremamente difficile figurarsi delle onde tanto piccole da averne 2000 in un millimetro e che si succedano tanto rapidamente da percorrere in un secondo 300 volte la distanza tra Torino e Taranto, pure con esse non si rinunzia in modo definitivo a rappresentarsi i processi dei fenomeni. Al contrario il fatto che la teoria delle oscillazioni elastiche nell'etere si è mantenuta tanto lungamente, nonostante le difficoltà manifeste, ben dimostra la tendenza a rappresentare tutti i fenomeni con delle immagini meccaniche correnti, a considerare il movimento come l'essenza di tutti i fatti naturali, e a salvare, a qualsiasi costo, il carattere descrittivo delle teorie. Nessuna intrinseca difficoltà fece alla fine naufragare questa teoria elastica, ma le prospettive aperte dalle nuove conquiste della scienza, alle quali si collegano i nomi di Faraday, Maxwell ed Hertz. La rappresentazione figurativa però ha ricevuto un forte colpo dalla nuova teoria elettromagnetica della luce. In mancanza d'altro ci si poteva ancora rappresentare le particelle dell'etere oscillanti con una velocità fantastica, ma come immaginare un campo di forze che si propagano cosí velocemente attraverso lo spazio, sempre col suo doppio gioco, perpetuamente cangiantesi, di forze elettriche e magnetiche perpendicolari tra loro? E tuttavia queste

forze elettriche e magnetiche, le quali durante il loro tragitto non fanno che crearne di nuove della stessa natura, sono tutto ciò che ci si poteva rappresentare della propagazione della luce. Tutta questa costruzione non aveva piú niente a che fare col movimento fisico delle particelle materiali; si rinunciava dunque di già ad una concezione del mondo strettamente meccanica, cioè unicamente fondata sul movimento. Ma la gran parte della fisica, la meccanica, l' acustica, la termodinamica e tutta la chimica, rimanevano al di fuori di questo cambiamento. In realtà, nonostante l' ultimo trionfo delle spiegazioni cinetiche nella brillante teoria dei gas di Boltzmann, che parla tanto all' immaginazione, l' importanza e l' estensione delle parti della fisica meccanicamente inesplicabili, aumentarono tutti i giorni, sopratutto dopo le scoperte di Roentgen, di Becquerel, della Signora Curie, di Rutherford, di Laue e di Planck.

Riprendiamo la spiegazione che abbiamo dato delle esperienze del Fizeau e del Michelson. Ne abbiamo concluso che la luce, osservata dal sistema in quiete, vibra nel sistema in quiete, osservata dal sistema in movimento, vibra nel sistema in movimento. Poiché non possiamo piú distinguere i sistemi in quiete e quelli in movimento, possiamo dire: la luce appartiene al sistema di non importa quale osservatore; per usare una felice espressione di Bloch, essa è " cosmopolita "; la sua divisa non è *ubi bene, ibi patria*, ma " La mia Patria è dappertutto dove mi si vede e dove mi si osserva."

Cerchiamo di fare ancor meglio spiccare questo concetto. Sino ad ora non abbiamo parlato che della propagazione rettilinea della luce; in realtà essa si fa in tutte le direzioni dello spazio, a forma adunque di sfera in tutti i lati. Supponiamo che nello spazio vuoto si produca un lampo luminoso in un punto determinato, e che nello stesso tempo questo punto sia attraversato da un innumerevole sciame di osservatori giungenti da tutti i lati con delle velocità differenti, tutti animati da movimenti rettilinei ed uniformi. Che cosa vedranno essi? Rappresentiamoci il fenomeno che si produce gettando una pietra nell'acqua; si forma un sistema di rughe anulari concentriche. Questi anelli s'ingrandiscono a mano a mano, ma per quanto grandi essi diventino, si distingue sempre il centro dal quale sono sorti e al quale rimangono concentrici; non abbiamo piú difficoltà a rappresentarci questo sistema di rughe trasportato col suo centro da un fiume di corrente tranquilla e continua: tutto il processo ben conosciuto della propagazione delle onde si ritrova se si considera l'acqua come un sistema in quiete relativa, e ciò nonostante noi possiamo senza difficoltà rappresentarcela come mobile in rapporto, per esempio, alla riva considerata come fissa.

In compenso ciò che oltrepassa la nostra immaginazione è di accettare che il sistema di onde possa avere parecchi centri divergenti, a partire da uno stesso punto con una velocità sensibilmente inferiore a quella del movimento ondulatorio, ma tuttavia notevole, e che, in qualsiasi istante uno qualunque di questi punti possa es-

sere considerato come il centro del movimento di propagazione.

Ora, per la luce, è precisamente a questa cónezione, prima che ad ogni teoria, che i fatti osservati ci costringono. Essi ci mostrano infatti che ciascun osservatore, quale che sia il suo movimento, deve sempre osservare nel suo sistema la costanza della velocità della luce in tutte le direzioni, e in conseguenza deve ammettere ch' essa si propaghi nello spazio secondo un sistema di sfere concentriche, di cui egli è il centro. Possiamo agevolmente immaginare che l'acqua scorra, ma ciò che supera le nostre facoltà è l' ammettere che essa scorra simultaneamente in tutte le direzioni che uno vuole, in modo che il centro, unico al momento della produzione dell' onda, si divida e che ciascuno dei punti particolari ottenuti rimanga, dopo come prima, il centro unico del movimento ondulatorio.

Ritorniamo alla nostra rappresentazione nello spazio e alle nostre sfere. Come togliere la difficoltà? Lorentz dice: Solo uno dei sistemi di sfere concentriche è il vero, è quello dell' etere in quiete assoluta, e solamente quando un osservatore è anch' egli in quiete rispetto all' etere, la sfera ch' egli percepisce coincide con quella che è assolutamente vera. Se gli altri osservatori credono, ciascuno dal canto proprio, di trovarsi al centro di sfere di propagazione ch' essi immaginano concentriche, è un' illusione che la variazione dei loro campioni di misura nasconde ai loro occhi. Quanto ad Einstein, come Nathan il saggio con i suoi tre anelli, dà ragione a tutti: ciascuna sfera è

la buona, però ciò non è vero in modo assoluto ma in maniera relativa, cioè per il suo osservatore. Al contrario, se un osservatore guarda in un sistema estraneo, la sfera che l'osservatore estraneo vi scorge gli appare deformata, non perché essa lo sia veramente, ma perché, uscendo dai limiti del suo sistema, egli impiega in maniera non lecita i campioni di misura che in esso erano valevoli. Non è che il sistema estraneo differisca dal suo: tutto al contrario essi si assomigliano come due gocce d'acqua, ma collocandosi in un sistema per fare delle misure in un altro, non si sono prese le precauzioni volute, e i fatti hanno preso la loro rivincita.

In tutto questo che cosa è diventato l'etere? Ha perduto il suo diritto all'esistenza! Per riprendere la nostra immagine, bisognerebbe paragonarlo all'acqua che scorre in tante direzioni quante uno vuole, o anche alla zattera della pagina 30, la quale è a volta a volta in quiete con l'osservatore in quiete, in movimento con l'osservatore in movimento. In fisica, in chimica ed in astronomia non era che un aiuto ben dubbio di cui si teneva conto, piú che altro, per spiegare la propagazione della luce. Ora, secondo Einstein, esso è in questa funzione piú di molestia che di utilità. Infatti ciò che ci importa sopra tutto e ciò che esige di essere anzitutto chiarito è la costanza della velocità della luce che non sarebbe comprensibile se non ammettendo l'etere in quiete in rapporto all'osservatore. Dovrebbe quindi esserlo in rapporto a tutti gli osservatori, o ciò che è lo stesso, dovrebbe partecipare a tutti

i movimenti possibili: disgraziatamente un corpo il quale non solamente non ha proprietà fisiche o chimiche ma che per di piú non ha uno stato di quiete o di movimento determinato, assomiglia pur troppo al famoso coltello senza manico a cui mancava la lama.

Con ciò però si sacrifica l'ultimo resto di rappresentazione figurativa. Un campo di forze che si propaga attraverso lo spazio vuoto con una rapidità fantastica; vibrazioni, ancor piú rapide, di una periodicità assolutamente regolare, senza il benché minimo substrato materiale provato o almeno immaginato al quale ricondurre questa propagazione — che sembra anche dipendere dall'osservatore che la percepisce — ecco chi si fa beffa di ogni tentativo di rappresentazione.

Ora, rappresentarsi un fenomeno non è altro che renderlo comprensibile per mezzo di un modello meccanico, reale od immaginato, poiché le sole cose che si concepiscono sono i fenomeni di movimento. La concezione secondo la quale si può ricondurre ad essi ogni cosa, vien chiamata, com'è noto, la rappresentazione meccanica dell'Universo: non la si può conservare dopo ciò che precede. Si vedrà anche che i vecchi principî della meccanica e i nuovi principî dell'elettromagnetismo non possono sussistere a fianco l'uno dell'altro in uno stato di uguaglianza; i primi devono essere subordinati ai secondi, poiché l'inverso è impossibile. Cosí la concezione astratta e matematica dell'Universo ha prevalso completamente sulla concezione meccanica e figurativa. Ora, che in teoria sia possibile ricondurre tutte

“ le cose tra cielo e terra ” se non a fenomeni di movimento, almeno a delle grandezze quantitativamente misurabili, soggette cioè a dei procedi menti matematici, noi non diremo nulla né in senso affermativo né in senso negativo.

Infine confessiamo al lettore, al quale l'immagine delle sfere concentriche e tuttavia eccentriche può apparire troppo astratta e penosa, che per il suo scopo e per non accumulare le difficoltà fino dal principio, abbiamo già di molto semplificato le rappresentazioni matematiche corrette. Una concezione veramente rigorosa obbliga a tener conto non solo della relatività dello spazio, ma anche di quella del tempo, della quale stiamo per occuparci.

V

LA RELATIVITÀ DEL TEMPO

La relatività del tempo sembra presenti ancora maggiori difficoltà di quella dello spazio. Il tempo si dice, è come uno scorrere continuo che solo la nostra coscienza può sentire completamente e chiaramente; e quindi esso può essere concepito indipendentemente da qualsiasi avvenimento esterno e si dovrebbe considerare per necessità come assoluto. Per demolire questa argomentazione sarebbe forse piú giusto in ogni caso parlare, anziché di una ” relatività del tempo ” di una “ relatività della misura del tempo ” e quindi lasciare

al lettore cosí consolato quanto egli voglia mantenere di assoluto dopo che la misura del tempo è relativa. Cominceremo dai

a) Principî della misura del tempo.

Enunciazione del problema

Supponiamoci in possesso di un orologio perfetto, regolato con i metodi astronomici usuali sul movimento apparente quotidiano della volta celeste, e che ci dia l'ora con una precisione cosí grande come noi la desideriamo. Abbiamo noi risolto la questione della misura del tempo? Sí certamente, sino a che noi restiamo allo stesso punto. Ma se noi vogliamo definire il tempo per tutta una zona in modo che in tutti i punti gli orologi segnino rigorosamente la stessa ora allo stesso istante, come faremo? Si potrebbe dire: procuriamoci un numero sufficiente di buoni orologi confrontiamoli con un orologio tipo sul quale li regoleremo, e trasportiamoli nei punti voluti. Procedendo cosí per un numero sufficiente di punti, noi definiamo il tempo nella nostra zona. Sarebbe perfetto se non fosse tanto difficile di rappresentarsi teoricamente questo trasporto che non si sa come esprimere matematicamente; niente ci prova ch' esso non cambia nulla alla marcia dei nostri orologi; per gli orologi a bilanciere la marcia dipende dal punto di stazione, e per tutti essa varia piú o meno secondo la temperatura. A parte tutte que-

ste circostanze accessorie, non si può forse pensare che la marcia di un orologio, esatta fino a che si trova a fianco del tipo, sia incerta una volta che l' orologio stesso è isolato? Il negarlo sarebbe supporre una perfezione assoluta nel lavoro dell' orologiaio, ma tal supposizione non ci può interessare. Per estendere la misura del tempo a tutta una zona vale meglio ammettere la necessità di un controllo reciproco degli orologi cosí frequente quanto piú si può desiderare: è cosí che si procederà in pratica. Tutti gli orologi che devono segnare la stessa ora, per esempio quella dell' Europa occidentale, sono collegati con un sistema di segnali che ci garantisce l' identità delle loro indicazioni. Non vi è in ciò alcuna difficoltà fintanto che la zona è abbastanza piccola, per il fatto che la trasmissione di questi segnali non richiede un tempo apprezzabile. Grazie alla velocità enorme dei fenomeni ottici, elettromagnetici o elettrici, rientrano in questo caso tutte le estensioni che geograficamente possono essere considerate ed anche la terra intera.

Supponiamo ora che la zona munita di orologi sia troppo grande perché si possa trascurare la durata della trasmissione, la quale, in ogni caso non è mai nulla. Ecco come procederemo: ad un istante determinato, per esempio alle ore 12, un osservatore A invia un segnale; quando questo arriva ad un secondo osservatore B, l' ora che B, fa segnare al suo orologio non è le 12: bisogna aggiungervi il tempo impiegato dal segnale per raggiungerlo. Questa correzione è tanto importante che noi insisteremo ancora sulla sua neces-

sità: siano *A*, *B*, *C*, i tre vertici di un triangolo equilatero; *A* emette un segnale; al ricevimento, *B* e *C*, segnano l'ora di emissione di *A* senza correzione. Gli orologi di *B* e *C* cammineranno quindi d'accordo, ma tutti e due ritarderanno su *A* della durata della trasmissione. Se ora si emette un segnale da *B* o *C*, il contrasto salta agli occhi; si vede che questo procedimento non permette una definizione del tempo valevole per tutto un sistema.

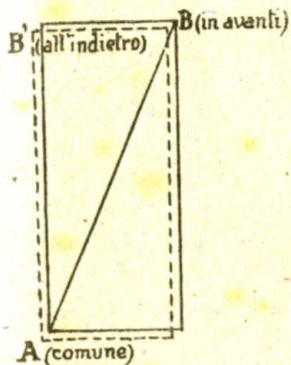
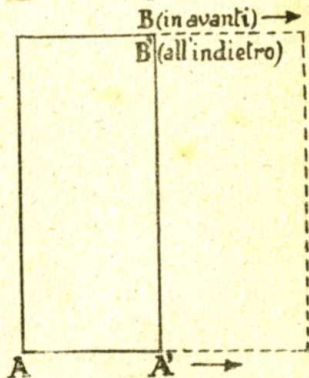
Bisogna quindi tener conto della durata della propagazione; naturalmente impiegheremo dei segnali luminosi, i soli utilizzabili sulla terra intera, e i soli che possano chiarire la questione che ci interessa; un segnale luminoso è dunque emesso da *A*; quando arriva a *B*, questi per mettere il suo orologio a punto, fa la correzione necessaria, ma non la può calcolare se non conosce la distanza *A B* e la velocità della luce. D'altra parte per maggiore sicurezza si può anche procedere cosí: *A* invia il suo segnale; *B*, appena l'ha ricevuto, ne invia un altro che *A* riceve; *A* ottiene la correzione dividendo per due l'intervallo di tempo tra la partenza del suo segnale e l'arrivo di quello di *B*. Procedendo in senso inverso anche *B* la otterrà e la potrà utilizzare. Ciò fatto i due osservatori possono confrontare i loro orologi. Questi orologi sottoposti ad un controllo continuo, sono chiamati sincroni.

Tutto questo non porta ad una difficoltà particolare insino a che *A* e *B* sono in quiete relativa o, secondo la nostra espressione, appartengono al medesimo sistema. È ciò che noi ammetteremo,

supponendo di piú che ciascun punto del sistema è munito del suo orologio. Si vede senza fatica che due di questi, sincroni di un terzo, sono sincroni tra loro; io non ho quindi bisogno che di un solo orologio tipo sul quale renderò sincroni gli altri ed avrò risolto in modo assolutamente soddisfacente il problema della determinazione del tempo in un sistema (è il procedimento che si può supporre impiegato pag. 40).

Immaginiamo ora piú sistemi, due per esempio, in movimento relativo rettilineo ed uniforme; si possono rappresentare come delle espressioni puramente matematiche, il che permetterà loro di spostarsi l'uno in rapporto all'altro penetrandosi. Si può, per esempio, immaginarli come formati di rette, o di superfici piane simili a dei fogli di carta, le rette o le superfici dell'uno scivolanti con un movimento rettilineo ed uniforme sulle rette o le superfici dell'altro, con le quali esse sono geometricamente confuse. Ogni punto può allora essere considerato come appartenente ai due sistemi, oppure, ciò che è lo stesso, ogni punto di un sistema è confuso ad ogni istante con un punto determinato dell'altro. Supponiamo ora tutti questi punti muniti di orologi, con la condizione essenziale che tutti quelli di un medesimo sistema siano sincroni tra di loro. Due orologi, appartenenti ciascuno ad un sistema differente e trovantisi ad un dato istante in uno stesso punto, possono segnare la stessa ora in questo istante. Ne consegue, in modo generale, che due orologi di sistemi differenti segnano la stessa ora nell'istante nel quale si incontrano?

b) **Esempio**

Rappresentiamoci due sistemi piani, due fogli di carta sovrapposti per esempio, quello di sopra in quiete, quello di sotto (punteggiato nella figura) in movimento verso la destra. Su quello di sopra si trova un osservatore *B*, su quello di sotto un osservatore *B'* (fig. a); dal punto *A*, che si può considerare come appartenente ai due sistemi, viene inviato un segnale luminoso che si propaga e arriva in *B* nel momento in cui *B'* vi passa (fig. b); *B'* non riceve quindi il segnale, emesso all'istante nel quale si trovava nella posizione della fig. a, che nel momento in cui egli

è in quella della fig. b). Il punto d'emissione del segnale che, al momento dell'emissione stessa appartiene ai due sistemi, è rimasto in *A* in quanto è punto del sistema fisso; per l'osserva-

tore B' in quanto è punto del sistema mobile, si è spostato ed è venuto in A'. Ricordiamoci l'esperienza di pag. 33; l'osservatore in marcia considera il segnale come emesso dal suo treno, l'osservatore in quiete come emesso dal suolo; quest'ultimo quindi fisserà in A la posizione della sorgente luminosa, il primo la fisserà in A'. D'altronde bisogna ben persuadersi che tutti e due hanno ragione; è la povertà dei termini e del disegno che ci costringe a qualificare l'uno di essi "fisso" e a favorirlo in apparenza; in realtà non c'è né "quiete" né "movimento", c'è "movimento relativo." Si potrebbe dire: fermiamo ogni movimento, lasciamo tutto in quiete e vediamo quale è, da B A o da B A' la buona direzione, se "fermare", "lasciare in quiete" non richiedessero uno spazio assoluto. D'altra parte non è logico provocare questo arresto al momento in cui il segnale arriva; lo sarebbe di piú il farlo al momento dell'emissione, poiché le sorti della sorgente nell'intervallo ci sono indifferenti: veramente se si tratta di una scintilla, essa può essere spenta dopo molto tempo. Ma all'istante dell'emissione l'arresto è superfluo; non vi è alcuna contraddizione perché i punti A e A' sono allora confusi. Piú tardi è a buon diritto che B considera A B' A' come veri successori del punto prima comune.

I due osservatori ricevono dunque simultaneamente il segnale in B e, mentre uno ne cerca l'origine in A l'altro la cerca in A' ambedue con ragione. Essi debbono, come abbiamo visto correggere la loro osservazione aggiungendo al-

l'ora d'emissione del segnale il tempo ch'esso ha impiegato a propagarsi, tempo che per ciascuno di essi è differente, poiché l'uno prende come tragitto $A\ B$, l'altro $A'\ B$, e poiché il percorso $A\ B$ è evidentemente superiore al percorso $A'\ B$. L'osservatore in quiete fa dunque una correzione maggiore, il suo orologio andrà avanti. Supponiamo ora i due sistemi muniti di orologi sincroni nel senso indicato nel capitolo precedente; gli orologi A e A' nel momento in cui passano per lo stesso punto, segnano la stessa ora, il nostro ragionamento dimostra dunque che è impossibile di definire per i due sistemi un tempo comune, in modo che due orologi qualsiasi di sistemi differenti diano sempre la stessa ora nell'istante in cui essi passano per il medesimo punto.

Non è privo d'interesse il trattare questo esempio col calcolo. Prendiamo come velocità quella della terra, cioè supponiamo che la terra si muova in linea retta con la velocità che essa ha sulla sua orbita; portati da essa noi rappresentiamo l'osservatore B', e arrivati in B noi troviamo un osservatore fisso; tutti e due allora osserviamo il segnale di A, ma in direzioni differenti; è evidente che questa differenza di direzione, cioè l'angolo $A\ B\ A'$, è ben piú piccola che sulla figura, poiché il cammino percorso dalla terra da B' a B (fig. a) e la distanza dei punti A ed A', che gli è uguale, sono molto piccoli in confronto alla distanza $A\ B$ percorsa dalla luce durante lo stesso tempo.

Domandiamoci durante quanto tempo la terra dovrebbe seguire la sua corsa rettilinea perché

la differenza delle durate dei percorsi luminosi $A\ B$ e $A'\ B$ fosse esattamente un secondo: si trova in cifra tonda, da sei a sette anni. Le distanze $B'\ B$ ed $A\ A'$ sono dunque da sei a sette volte eguali alla lunghezza dell'orbita terrestre. La luce percorrerebbe $A\ B$ in sei o sette anni, e $A'\ B$ sarebbe piú corto di appena un "secondo luce" ossia 300.000 chilometri. L'angolo $A\ B\ A'$ è allora di un terzo di minuto, la centesima parte circa del diametro apparente del sole e della luna. Ritorneremo sulla questione piú avanti.

Le stelle fisse piú vicine si trovano ad alcuni anni-luce; ce ne sono dunque alcune appena piú lontane che i sei anni-luce di $A\ B$. In rapporto all'insieme del mondo stellare percettibile ai nostri telescopi, è il piú prossimo vicinato. Supponiamo dunque che da A si emetta un segnale luminoso che per tutta la zona circostante deve fissare il principio di un'êra nuova; i due osservatori registreranno la stessa data, le posizioni delle lancette delle ore e dei minuti dei loro orologi coincideranno, ma per le lancette dei secondi per quanto gli osservatori stessi siano allo stesso punto e facciano le loro osservazioni col medesimo scrupolo, quella dell'osservatore in movimento sarà in ritardo di un secondo.

Questo esempio mostra la straordinaria piccolezza dei cambiamenti, resi necessari dalla teoria della Relatività.[1]

[1] È indispensabile insistere sulla straordinaria piccolezza delle correzioni portate dalla nostra teoria alla misura del tempo. Ritenere, sotto il pretesto che l'orologio mobile ritarda, che muoversi è invecchiare meno velocemente, non è naturalmente che un'immagine forzata, come quella della pag. 34, nella quale abbiamo parlato del signore obeso che il movimento fa

Nella vita corrente e anche nei lavori scientifici, abbiamo da fare con velocità ben inferiori a quella della terra, con durate ben piú corte che sei anni-luce, con distanze molto piú brevi di quella pari a sei volte l'orbita terrestre. Se dunque, praticamente e nella fisica che precedette Michelson: si è potuto, senza disaccordo con l'esperienza, utilizzare delle rappresentazioni assolute, non bisogna vedere in ciò una contraddizione col principio di relatività. I vecchi principî meccanici di Galileo e Newton, nel ristretto campo di spazio e di tempo nel quale li si impiega, si accordano con tale principio e possono continuare senza pericolo ad essere tenuti come valevoli per gli usi domestici, se cosí si può dire. In campi piú vasti invece, essi sono subordinati ai principî piú generali della relatività elettromagnetica.

dimagrire. Sembra che disgraziatamente ci sia della gente che prende per oro colato queste innocenti facezie. C'è un altro errore sul quale vorrei attrarre l'attenzione. Se due osservatori s'incontrano, dal punto di vista relativista, ciascuno di essi può considerarsi come in quiete e considerare l'altro come in movimento; ma se tutti e due si ritrovano di nuovo, uno almeno ha dovuto fare mezzo giro (ciò che è incompatibile col movimento rettilineo ed uniforme) e in conseguenza non può piú considerarsi come se fosse rimasto in quiete. Questo fatto è stato cosí spesso spiegato (per esempio da Einstein nel suo dialogo. Bloch, pag. 68. Vedi Bibliografia) che in principio ho ritenuto inutile ritornarvi su. Ma in una riunione alla Filarmonica di Berlino il 24 agosto 1920 davanti piú di mille persone, il principale conferenziere ha riunito i due precedenti errori; egli credeva che dal punto di vista relativo ciascuno dei due osservatori poteva dire: io sono rimasto in quiete e tu ti sei spostato, io sono invecchiato e tu sei rimasto giovane, e per andare sino alla fine, io sono morto e tu vivi!

c) L'aberrazione

Nel capitolo precedente la differenza dei tempi tra gli orologi in quiete e in movimento si ricollega, in un caso particolare, alla differenza delle direzioni nelle quali ciascuno dei due osservatori cerca il medesimo punto. Questa differenza di direzione è assolutamente indipendente dalla teoria della Relatività; essa è conosciuta dagli astronomi già da duecento anni, e la sua valutazione pratica fa parte del lavoro quotidiano dell'astronomo. Questi fatti, che si adattano molto bene nella nostra teoria e sono facili a comprendere, non sono sempre trattati in modo soddisfacente nelle opere di astronomia popolare; noi quindi ci fermeremo su di essi un po' piú a lungo di quello che non l'esigerebbe lo scopo del nostro lavoro.

Per prendere un paragone spesso usato, immaginiamo un uomo munito di un tubo cilindrico, che gli faccia come da grondaia, il quale cammini sotto la pioggia. Se non c'è vento questa cade rigorosamente secondo la verticale. Supponiamo che il nostro uomo si sia proposto di portar la sua grondaia in modo che le gocce d'acqua la traversino senza incontrare ostacolo senza toccarne le pareti; è evidente che, se non si muove, la dovrà tenere verticale. Egli si mette allora in moto e vuole continuare il suo tentativo. S'egli mantiene la grondaia nella stessa posizione, le gocce che entrano dall'alto vengono ad urtarla alla parte posteriore e non la traversano perciò senza trovare ostacolo; ma se egli la inclina nel

senso del suo movimento cioè in avanti, le gocce non saranno piú ostacolate.

Di quanto egli deve inclinare la grondaia? Ciò dipende dalla sua velocità e da quella delle gocce. Se queste cadono lentamente, l' inclinazione sarà notevole; se cadono con velocità o, ciò che è lo stesso, se il nostro uomo cammina lentamente, detta inclinazione sarà leggera. Il rapporto delle due velocità, del movimento delle gocce e di quella dell' osservatore, determina cosí l' ampiezza dell' angolo d' inclinazione. Per prendere un altro esempio, supponiamo che uno spari un colpo di fucile su di un treno in corsa, che la palla entri da un finestrino ed esca dal finestrino opposto. Se la direzione del tiro è perpendicolare a quella del treno, tale direzione non sarà la stessa di quella osservata da un viaggiatore che esamini il foro di entrata e quello di uscita, perché il treno si è spostato mentre la palla lo attraversava. Anche qui l' ampiezza dell' angolo della deviazione dipende dal rapporto delle due velocità del proiettile e del treno.

Passiamo ora all' applicazione: quando noi puntiamo verso una stella un cannocchiale astronomico, mentre la luce lo percorre, il movimento della terra ci trasporta: noi dobbiamo quindi inclinare il cannocchiale nel senso del nostro movimento, e tanto maggiormente quanto maggiore è la nostra velocità in rapporto a quella della luce. Nella piú semplice disposizione, in quella cioè dei nostri due esempi e in quella dell' ultimo capitolo, le direzioni delle gocce di pioggia, della palla da fucile e della luce sono perpendicolari a quella

dell' osservatore; nel caso della luce si trova allora l' angolo di $^1/_3$ di minuto, ossia il $^1/_{100}$ circa del diametro apparente della luna o del sole. Questo fenomeno ben conosciuto dagli astronomi già da lungo tempo è " l' aberrazione."

Vi è qui ragione per parecchie osservazioni. Abbiamo dato or ora una spiegazione assolutista dell' aberrazione, secondo il principio della relatività meccanica, mentre che nel capitolo precedente ci eravamo appoggiati sul principio della relatività elettromagnetica; la differenza essenziale è che i movimenti della meccanica si combinano secondo il " parallelogramma delle forze " mentre che la teoria della relatività elettromagnetica nega la possibilità di comporre il movimento della luce con un movimento qualunque. Tutti e due tuttavia sono in grado di spiegare il fenomeno e conducono allo stesso risultato quantitativo.

La seconda osservazione è che in piú della prospettiva spaziale ben conosciuta, vi è una specie di prospettiva cinematica. Si sa che lo stesso paesaggio non ha lo stesso aspetto a seconda del punto dal quale lo si osserva. La teoria dell' aberrazione ci mostra di piú che, da uno stesso punto, il suo aspetto varia secondo la direzione e la velocità dell' osservatore che passa per quel punto, e la variazione è tanto piú grande quanto piú grande è questa velocità. Anche se tale velocità non fosse che quella del suono, i metodi astronomici moderni potrebbero pur sempre scoprire l' aberrazione ch' essa produrrebbe.

D' altra parte dal punto di vista del principio

della relatività elettromagnetica è per un capriccio arbitrario che si battezza quiete il movimento di un osservatore e movimento quello di un altro. Non dovremmo parlare che del loro movimento relativo e in conseguenza altro che di un' aberrazione relativa, cioè di quella di un osservatore in rapporto all' altro. Siccome non abbiamo alcun osservatore col quale paragonare le posizioni delle stelle che osserviamo, si può domandare perché parliamo di un' aberrazione e come mai la mettiamo in evidenza: La risposta è che l' astronomia non avrebbe dovuto mai occuparsene se il movimento della terra fosse rettilineo ed uniforme, perché essa avrebbe un valore costante. Ma per effetto della nostra rotazione attorno al sole, la direzione del nostro movimento cambia e con esso cambiano la direzione e la grandezza dell' aberrazione che quindi in realtà, non è che relativa in rapporto a quella del sole. La sua scoperta fu, a suo tempo, la prima prova veramente magnifica del valore del sistema di Copernico, prova che non era del tutto facile a trovare come abbiamo visto nel nostro primo capitolo. Quanto a ciò che è l' aberrazione assoluta, si può senza inquietudine considerare come in quiete l' insieme delle stelle fisse, poiché è precisamente su di esso che l' osservazione porta; resterebbe dunque da calcolare l' aberrazione assoluta del sole, conoscendo il suo movimento in questo insieme; per il momento non è possibile altro che con una grossolana approssimazione. D' altra parte ciò non cambierebbe la posizione di ciascuna stella che di una quantità fissa, il che sarebbe

senza importanza, poiché la maggior parte delle ricerche astronomiche non hanno per oggetto altro che i movimenti relativi delle stelle tra di loro.

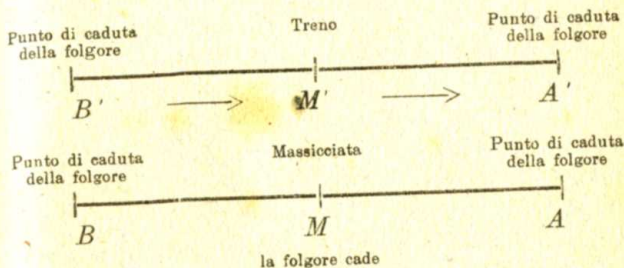
Ci si può infine domandare come si è giunti a misurare l'aberrazione relativa della terra in rapporto a quella del sole, il che esige dei punti di riferimento fissi, direzioni o punti non soggetti allo spostamento che si produce per tutte le stelle; ma in effetti si hanno di tali punti di riferimento. Nell'esempio del tiro contro il treno, nonostante tutte le deviazioni, è chiaro che si può sempre distinguere la direzione orizzontale e il piano orizzontale; la traiettoria della palla non sembrerà orizzontale al viaggiatore se essa non lo sarà veramente. Nello spazio è il piano della traiettoria terrestre, l'ecclittica, che a dispetto di tutte le aberrazioni, resta invariabile. D'altra parte la direzione dell'asse di rotazione della terra che determina il polo celeste è indipendente, essa pure, dal movimento di traslazione. Questi due elementi fissi, ecclittica e polo celeste, permettono la determinazione assoluta dell'aberrazione relativa della terra in rapporto a quella del sole.

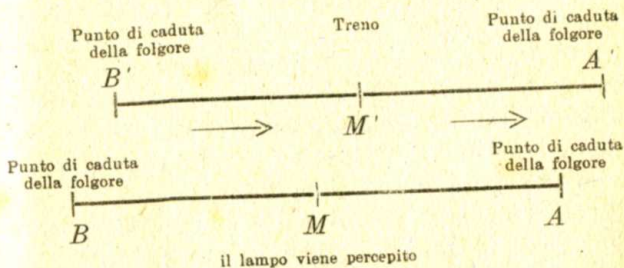
Ritorniamo al nostro soggetto, dopo questa piccola digressione della quale chiediamo venia.

d) **Secondo esempio**

La figura seguente rappresenta un treno lungo 300.000 chilometri alla metà del quale si trova un osservatore *M'*. Nel momento in cui questi

passa dinanzi ad un osservatore *M* posto sulla massicciata, la folgore cade sulle due estremità del treno senza provocare altro accidente che la rottura di alcuni vetri sul treno e lo scavamento di alcuni solchi sulla massicciata, in modo che il convoglio può continuare la sua corsa senza ostacolo.

la folgore cade

Al termine di un mezzo secondo avremo la disposizione seguente:

il lampo viene percepito

Se *M*, come noi ammetteremo, percepisce nel medesimo istante i due lampi, ciò non può essere per *M'*; poiché la luce proveniente da destra gli giunge prima, quella da sinistra piú tardi che

in M; M' vede quindi il lampo A prima del lampo B. Fin qui sembra non vi sia nulla di straordinario; M' percepirebbe in effetti un segnale sonoro proveniente da A prima che se venisse da B e ciò non ci condurrebbe a pensare che il tempo può essere relativo. Perché, M' deve dire a se stesso che egli è in movimento in rapporto all' aria; o anche ch' egli è immobile e che il vento soffia lungo il treno ma, in ogni caso, egli deve ammettere una velocità relativa del suono dalla destra superiore a quella dalla sinistra alla destra; egli non sarà dunque autorizzato, dal fatto che i due segnali sonori non arrivano simultaneamente, a concludere ch' essi non sono prodotti nello stesso tempo. È tutt' affatto differente per l' osservatore che si serve dei segnali ottici. Nel suo caso non vi è, per la propagazione della luce, alcun sistema corrispondente all' aria e che prenda uno stato di movimento determinato; al contrario egli ha certamente fatto l' esperienza del Michelson e sa che per essa la luce si propaga nelle due direzioni con la stessa velocità. Come punto d' emissione delle onde luminose egli non può considerare che i vetri dei finestrini rotti egualmente distanti, A' e B', perché egli riporta ad un movimento della massicciata l' ineguaglianza delle distanze dei due solchi sul suolo in A e B, se pure egli la nota, dato che niente lo obbliga a guardare fuori dal finestrino. M' deve dunque pensare che le durate di propagazione dei due lampi sono uguali, ed in conseguenza egli è autorizzato, dall' arrivo non simultaneo dei due segnali luminosi a concludere che la loro emissione

non è stata simultanea: due avvenimenti che per M sono simultanei, non lo sono per M'.

Numerosi trattati popolari lasciano credere al lettore che l'osservatore può, dalla percezione non simultanea dei due segnali, conchiudere senz'altro nei riguardi della loro emissione non simultanea; noi mettiamo in guardia il nostro lettore contro questa conclusione troppo affrettata.

VI

INTEGRAZIONE DEI CONCETTI SIN QUI ESPOSTI E RICAPITOLAZIONE

Abbiamo ora fatto conoscenza con le relatività del tempo e dello spazio secondo Einstein; è venuto il momento di dimostrare che non si può, in nessun caso, separarle col pensiero. Sin qui questa separazione è stata ora supposta a priori, ora tacitamente accettata dal lettore; anche la nostra esposizione presentava delle manchevolezze che a poco a poco andiamo correggendo, o quanto meno mettiamo a mano a mano in luce.

Ritorniamo a tutta prima all'importante esempio del treno in corsa (pag. 33); ricordiamo il fatto capitale di tutta la teoria della relatività, quello che presentava insormontabili difficoltà alle nostre concezioni: se al momento del suo passaggio davanti ad un osservatore, dall'ultimo vagone del treno di 300.000 chilometri, viene lanciato un segnale che sia emesso dal predellino del treno o dal suolo, un viaggiatore da una

parte, l'osservatore a terra dall'altra troveranno ambedue che in un secondo la luce percorre 300.000 chilometri, benché durante questo secondo il treno si sia spostato. Che si giudichi il fatto credibile o meno, noi lo consideriamo come dimostrato dall'esperienza, e quando l'esperienza ha fatto le sue dichiarazioni la questione è risolta per lo scienziato, o almeno per il teorico, poiché l'esperimentatore può sempre ricominciare le sue prove. Noi a tutta prima abbiamo cercato una spiegazione con Lorentz dicendo che il treno si era contratto. Se ciò fosse la sola ragione, vorrebbe dire semplicemente che la locomotiva è rimasta immobile e che i vagoni si sono serrati verso l'avanti; con questa ipotesi solamente si potrebbe ammettere la coincidenza delle estremità dei 300.000 chilometri del viaggiatore e dell'osservatore fisso. Si è presto convinti della impossibilità di adottare questo modo di vedere senza andare ad urtare contro intrinseche contraddizioni. Poiché se noi supponiamo il segnale emesso in senso contrario alla corsa, dalla locomotiva per esempio, e se a tutta prima facciamo astrazione dalla contrazione, l'osservatore in quiete deve accorgersi che al termine di un secondo la luce non ha solamente raggiunto l'ultimo vagone, ma l'ha oltrepassato perché durante questo tempo il vagone si è spostato in avanti. E dato che il viaggiatore vede arrivare la luce giusto alla coda del treno nello stesso lasso di tempo, se vogliamo risolvere la questione con un metodo analogo a quello seguito sin qui, dobbiamo ammettere un allungamento del treno tale che l'ultimo vagone

sia rimasto immobile, mentre la locomotiva ha avanzato. La contraddizione è evidente: al momento della partenza non si sa ancora se il segnale è emesso nella direzione del movimento o nella direzione contraria; nulla del resto c'impedisce d'immaginare due segnali simultanei inviati ciascuno in un senso. Se il nostro treno fosse dotato della parola si dichiarerebbe forse pronto a farci di gran cuore il piacere di cambiare di lunghezza quanto noi volessimo, ma sarebbe troppo chiedergli di allungarsi e raccorciarsi nel medesimo tempo!

Il problema non è solubile con i procedimenti puramente geometrici; non può esserlo che per mezzo delle considerazioni di tempo. Riprendiamo il nostro segnale partito dall'indietro. Supponiamo una contrazione ben piú debole,[1] in modo che la locomotiva possa essersi spostata in avanti; essa è ora piú di 300.000 chilometri dal punto di partenza; la contraddizione sembra si sia aumentata perché, nonostante tutto, il viaggiatore constata che la luce è arrivata sino a lui. Ma ammettiamo che il suo orologio, che andava d'accordo con quello dell'osservatore fisso al principio del secondo, sia andato piú lentamente durante questo lasso di tempo: esso ritarda quindi e l'osservatore fisso potrebbe dire al suo collega: amico mio, tu misuri e misuri nuovamente senza accorgerti che il secondo in questione è passato già da tempo! Il tuo orologio non cammina piú. Io

[1] In base alle considerazioni della pagina 34 la contrazione del diametro terrestre oltrepasserebbe un chilometro mentre che secondo la teoria esatta essa non è che di cm. 6.5.

voglio ammettere che la luce sia arrivata alla tua locomotiva, ma non tentar nemmeno di farmi credere che vi sia giunta in un secondo.

I fatti sono analoghi nel nostro esempio delle onde luminose concentriche della pagina 48. Ciascun osservatore osserva che ogni punto dello spazio è, a suo turno, raggiunto dalla luce; gli è sufficiente aspettare abbastanza lungamente perché ogni punto dell'universo ne riceva la sua parte. Se egli afferma che la luce si propaga secondo una sfera, egli naturalmente vuol dire che i punti della superficie di una sfera sono simultaneamente raggiunti da essa. Ma il concetto di simultaneità non ha nulla di assoluto, come lo dimostra l'ultimo capitolo, esso varia con l'osservatore; ciò che è simultaneo per l'uno può non esserlo per l'altro. Se uno dei nostri osservatori per convincere i suoi colleghi tentasse, per esempio, di fermare la propagazione della luce ad un istante determinato per fare le sue misure con tutta tranquillità e subito dopo gridasse: "Voi vedete bene che la luce ha descritto una sfera della quale io sono il centro!" probabilmente gli si risponderebbe sorridendo: "Mio caro, io non nego che la luce sia giunta ai punti che tu hai segnato, ma non certo simultaneamente! Secondo me essa era in questa regione della sfera che tu hai biffata, prima di essere in quest'altra. E in quanto a ciò che è del tuo metro, dopo come prima, io conservo la mia opinione sul suo conto."

Se noi abbiamo considerato a parte le modificazioni dello spazio e del tempo è solamente per facilitarne l'intelligenza. In effetti esse non sono

indipendenti ma al contrario, strettamente collegate. Supponiamo, per meglio dimostrarlo, la sola relatività dello spazio; guardiamo il nostro orologio; immaginiamolo abbastanza lontano perché sia necessario aggiungere al tempo letto, il tempo impiegato dalla luce per venire dal quadrante al nostro occhio; questa correzione dipenderà naturalmente dalla distanza dell' orologio e sarà differente per due osservatori che stimeranno diversamente questa distanza. Vediamo dunque che "la relatività delle grandezze spaziali ha per conseguenza la relatività della misura del tempo." Supponiamo invece il tempo solo relativo; ricordiamoci come, a pag. 40, noi abbiamo misurato il treno in corsa segnando nello stesso istante con dei segni di gesso le posizioni delle sue due estremità sulla via; se non si hanno le stesse idee sulla simultaneità, i segni di gesso cadranno, in conseguenza del movimento del treno, in punti differenti e perciò si troveranno lunghezze differenti. Quindi "la relatività delle grandezze dei tempi ha necessariamente come conseguenza quella delle misure dello spazio." Questa reciproca dipendenza delle variazioni tra le misure del tempo e dello spazio è senza contestazione uno dei piú grossi ostacoli alla comprensione della teoria della relatività.

Il primo problema di questa teoria è quello della determinazione generale delle relazioni che legano le misure di spazio e di tempo in due sistemi in movimento relativo rettilineo ed uniforme, relazioni che vengono chiamate "equazioni di tra-

sformazione." È Lorentz che le ha trovate, ma Einstein è giunto, con la teoria, a dedurle da due ipotesi:

1. L'invariabilità della velocità della luce qualunque sia l'osservatore; noi ammetteremo che è sufficientemente dimostrata dall'esperienza.

2. La relatività di tutti i movimenti rettilinei ed uniformi. Tutti i sistemi in movimento relativo rettilineo ed uniforme godono esattamente delle stesse proprietà. È impossibile distinguere uno che sia "in quiete." Tutte le leggi naturali sono assolutamente identiche qualunque sia il sistema nel quale esse vengono studiate. In particolare il passaggio da un sistema ad un altro deve farsi come il passaggio inverso, cioè per mezzo delle stesse equazioni di trasformazione.

Le difficoltà di calcolo, puramente matematiche, non sono cosí grandi come potrebbe sembrare a prima vista, almeno sino a che ci si limita ai primi principî della teoria che abbiamo qui accennata. Tali difficoltà nascono sempre dalla lotta senza tregua che risorge tra l'immaginazione che vuole una rappresentazione che le parli, e la teoria che, basata su fatti non rappresentabili e su calcoli piú astratti ancora, dimostra l'impossibilità di questa rappresentazione.

Per finire, a noi è necessario rispondere ad una questione che ritorna sempre in queste discussioni e che il lettore si sarà di già posta. Un sistema può muoversi con la velocità della luce o una velocità superiore? La risposta non è difficile. Supponiamo che il nostro treno corra piú velocemente della luce: un segnale luminoso,

emesso dal vagone di coda, dovrebbe per un viaggiatore propagarsi sul treno, mentre che per l'osservatore in quiete esso si troverebbe all'indietro e di tanto maggiormente quanto maggiore il tratto che il treno avesse percorso. Non vi è alcun mezzo per levare questa contraddizione; non resta che una soluzione: queste velocità sono impossibili; non possono esserci dei corpi che si muovano piú velocemente o anche tanto velocemente come la luce. Ecco alcuni dati numerici: le velocità dei corpi celesti sono da 10 a 30 chilometri al secondo; eccezionalmente qualche centinaio di chilometri, appena il $^1/_{100}$ di quella della luce; i corpuscoli dei raggi catodici, sopratutto. i raggi β del radium sono piú rapidi; questi ultimi giungono al 99 % della velocità della luce. Questa si comporta in qualche maniera come lo zero assoluto in calore; non si può raggiungerlo, per quanto lo si possa avvicinare molto. Se un giorno si trovasse una velocità superiore, essa causerebbe evidentemente una rivoluzione di tutta la nostra fisica teorica. Tuttavia bisogna notare che tali velocità non sono direttamente osservabili, ma sono dedotte da una teoria; ci si risolverebbe dunque senza dubbio a modificare un punto qualsiasi di tale teoria per quanto ciò fosse possibile, per accettare i nuovi fatti.

Si deduce facilmente da questa considerazione un'altra conseguenza. L'impossibilità di raggiungere la velocità della luce non può rivelarsi per cosí dire subitamente; si vede senza fatica che è impossibile che un corpo raggiunga una velo-

cità uguale al 99% di quella della luce cosí facilmente come lo permette la vecchia meccanica, per non trovare impossibilità altro che ad acquistare l'ultimo centesimo. Una resistenza crescente deve dunque farsi sentire dopo il principio. Ora, la resistenza che un corpo oppone all'aumento della sua velocità è la sua "massa;" in conseguenza noi vediamo che "la massa di un corpo, considerata sino ad ora come una costante assoluta, aumenta con la sua velocità." Ciò non si può notare per i movimenti ordinari, eccessivamente lenti in confronto alla luce, ma, per i movimenti rapidi degli elettroni, che i raggi catodici e i raggi β del radium ci mostrano, questa conseguenza si verifica molto bene.

VII

LA RAPPRESENTAZIONE A QUATTRO DIMENSIONI DEL MINKOWSKI [1]

Abbiamo negato a piú riprese la possibilità di una rappresentazione concreta della teoria; tuttavia in una certa misura il matematico Minkowski di Gottinga, disgraziatamente strappato troppo presto alla scienza, è riuscito a stabilirne una, in una conferenza tenuta a Colonia nel 1908. Benché non aggiunga nulla ad Einstein dal punto di vi-

[1] Questo capitolo, come il capitolo XV presenta alcune difficoltà per i non matematici; non è indispensabile per la comprensione di quello che segue.

sta puramente fisico, questa conferenza deve essere annoverata tra gli scritti classici della Relatività per la sua straordinaria bellezza matematica; essa d'altronde ha grandemente contribuito a diffondere la teoria tra i matematici. È nello spazio a quattro dimensioni che Minkowski ha tentato questa rappresentazione: ecco ciò che sembra al non matematico il colmo della piú folle astrazione. Pure non vi sono in ciò che dei fatti assai semplici. Per un matematico una retta non è che un pretesto per dare a ciascuno dei suoi punti una cifra, presso a poco come lo si fa sopra un metro, su di una scala barometrica o termometrica, o in altre circostanze analoghe. Alla stessa maniera un piano è la possibilità di raggruppare in un modo qualsiasi due numeri che si possono figurare come portati da due rette rettangolari, chiamate assi; ciascun punto del piano corrisponde ad una coppia di due numeri che rappresentano le sue distanze sulle due assi. Infine lo spazio dà un'occasione di concretare per un solo punto l'insieme di tre numeri, rappresentanti tre grandezze, per esempio la lunghezza, la larghezza e l'altezza. Se si continua in questa via, raggruppando quattro numeri, non vi è piú alcuna rappresentazione possibile nello spazio, ma, inversamente, il raggruppamento dei numeri che si fa come per la retta il piano e lo spazio ordinario, dà una rappresentazione dello spazio a quattro dimensioni, nella quale si raggruppano sempre quattro numeri invece di uno, due o tre, come nelle costruzioni precedenti. In queste ultime la conoscenza dello spazio aiu-

tava lo studio del concetto numerico; nelle altre invece si sostituisce la rappresentazione numerica alla rappresentazione geometrica, che non c'è.

In questa costruzione numerica a quattro termini che il matematico chiama "spazio a quattro dimensioni" e che il profano giudica una pura astrazione, Minkowski è giunto a trovare la rappresentazione completa della quale si era sino ad allora deplorato l'assenza. In particolare l'interdipendenza delle grandezze di spazio e di tempo, che anche noi ci siamo sforzati di far risaltare, vi appare sotto una forma notevolmente figurativa, il tempo vi figura come un'asse allo stesso titolo delle assi dello spazio, il che gli toglie ogni particolarità. Parlare di un punto dello spazio o di un punto del tempo non può avere alcun senso se non in un dato sistema; ciò che ci è dato direttamente non sono né punti dello spazio né punti del tempo, sono degli avvenimenti, la cui determinazione ha bisogno e dei dati di tempo e dei dati di spazio. Prendiamo un esempio per continuare le nostre spiegazioni.

Io tengo una penna in ciascuna delle due mani e su due fogli di carta distanti tra loro un metro fo, quasi simultaneamente, una piccola macchia. In base alla vecchia concezione si diceva naturalmente: poiché questi due avvenimenti non sono simultanei, sono separati e nel tempo e nello spazio. Ma ora possiamo guardare i fatti sotto un'altra luce; ammettiamo che io abbia fatto le macchie ad $^1/_{100}$ di secondo d'intervallo; i due avvenimenti sono naturalmente "distinti nello spazio" fino a che io considero il sistema della

tavola come in quiete, il che è molto prossimo alla realtà. Niente però m' impedisce d' immaginare un sistema che abbia, rispetto ad essa tavola, una velocità relativa tale che nell' intervallo di tempo che separa le due macchie uno dei suoi punti sia precisamente passato dall' una all' altra; le due macchie saranno, ma in istanti differenti, al medesimo punto di questo sistema; supponiamolo costituito da una sottile striscia di carta, come quella dei telegrammi, sulla quale si sia collocato un piccolo osservatore; questi penserà che è tranquillamente rimasto al posto e che due volte, a breve intervallo, l' inchiostro gli è fischiato agli orecchi; se l' inchiostro è caduto in due punti differenti della tavola, è che questa si sposta sotto di lui con una grande velocità; per questo osservatore i due avvenimenti non sarebbero quindi distinti che nel tempo, ma non lo sarebbero nello spazio. Questo non è il solo caso possibile; supponiamo che i due avvenimenti, che si sono prodotti alla distanza di un metro, si siano succeduti in meno di un trilionesimo di secondo; non si può piú immaginare un sistema che in questo piccolo intervallo, si sia spostato da una macchia all' altra, perché gli sarebbe necessaria una velocità superiore a quella della luce, il che è impossibile. Al contrario, ma noi qui non lo possiamo dimostrare, se ne può trovare uno nel quale i due avvenimenti sono simultanei e non sono distinti che nello spazio. Minkowski direbbe: " Questi due avvenimenti sono separati da un " intervallo spaziale," i due primi lo erano da un " intervallo cronologico." È facile vedere che il fe-

nomeno della propagazione della luce segna il limite degli intevalli spaziali cronologici.

Nella vita corrente si trova semplice il parlare di distanza nel tempo e di distanza nello spazio tra due avvenimenti; è semplicemente un procedimento comodo alla stessa maniera che può essere vantaggioso, secondo le direzioni delle strade, camminare in principio verso sud, poi verso est, piuttosto che direttamente a sud-est.

Tutte queste relazioni e molte altre si presentano sotto una forma immediatamente concreta nella rappresentazione a quattro dimensioni del Minkowski; di qui la nota sentenza: " A partire da ora lo spazio e il tempo devono sparire nell' ombra quali entità distinte, e solamente una certa combinazione dei due può aspirare alla autonomia."

Per quanto questo detto possa essere sorprendente, mi sembra tuttavia che il Sig. M. Schlick l' abbia oltrepassato: in base alla teoria della relatività generale, dice egli, questa combinazione non è, anch' essa, che un' ombra, un' astrazione; solamente l' insieme del tempo, dello spazio e delle cose ha una realtà indipendente poiché contrariamente al pricipio della relatività particolare il principio della relatività generale nega che si possa, una volta per tutte, stabilire uno schema assolutamente generale come quello di Minkowski senza conoscere le cose, gli avvenimenti ch' esso deve servire a rappresentare.

Il Signor Professore Boehmer di Dresda mi ha messo gentilmente a parte di una rappresentazione della concezione di Minkowski che mi è

parsa eccellente. Una prova fotografica rappresenta su di una superficie piana una porzione del mondo a tre dimensioni. Figuriamoci dei movimenti qualsiasi riprodotti come in un film da un gran numero di vedute succedentisi a breve intervallo. Le numerose immagini ottenute sono subito posate le une sulle altre come le pagine di un libro e danno cosí un blocco rettangolare; l'ordine dei foglietti è di una tale precisione che tutte le riproduzioni di uno stesso punto dello spazio sono rigorosamente l'una dietro l'altra. Facciamo un taglio nel nostro blocco; se è fatto secondo il piano di uno dei fogli, esso dà un'immagine dello spazio tale e quale com'era ad un dato istante; se esso è perpendicolare al piano dei fogli, la superficie del taglio ci dà, per cosí dire, la storia di una linea dello spazio, poiché le sezioni dei fogli successivi ci mostrano come è apparsa questa linea negli istanti nei quali si sono prese le vedute; la superficie intera formata dal loro insieme ci mostra dunque come essa ha variato a poco a poco. Vedremo ora che queste due specie di sezioni, cosí differenti a primo esame, non lo sono in modo assoluto, ma che tra di loro due esistono tutti gli intermediari. Quale è infatti la sezione che deve fare un osservatore che si muove rispetto a quello che ha preso le vedute e che vuole, dal canto suo, seguire la storia di una linea dello spazio? Poiché egli è in movimento, la linea ch'egli considera si sposta a sua insaputa, o piuttosto, nel corso del tempo, egli identifica con la linea considerata in primo luogo, linee differenti da quelle considerate dal-

l'osservatore che per se stesso si ritiene "in quiete;" e poiché noi ammettiamo che il suo movimento è rettilineo e uniforme, si vede facilmente che la sezione deve essere fatta con un piano che non è piú perpendicolare ai fogli e il cui angolo differisce tanto maggiormente da un angolo retto, quanto piú rapidamente il secondo osservatore si muove rispetto al primo. Quanto alle immagini che rappresentano l'aspetto dell'universo ad un dato istante, anch'esse non sono le stesse per i due osservatori: abbiamo dimostrato nel capitolo quinto sulla relatività del tempo che essi non considerano come simultanei gli stessi avvenimenti; ed è facile vedere che la differenza dei tempi è tanto piú grande quanto piú lontano dagli osservatori si producono gli avvenimenti da paragonare. Nello stesso capitolo abbiamo visto che per la velocità della terra era necessaria una distanza di sei anni-luce per ottenere una differenza di un secondo di tempo; per una distanza di dodici.... diciotto anni-luce, la differenza sarebbe di due, tre.... secondi. Se si sono prese dieci vedute al secondo, per avere una veduta relativa ad un dato istante, all'osservatore in movimento avente velocità uguale a quella della terra, bisognerà che la sezione abbia una inclinazione tale da tagliare dieci fogli tra due piani che sono ad essi perpendicolari e sono distanti sei anni-luce. Si vede agevolmente che la sezione che rappresenta un aspetto simultaneo è tanto piú inclinato, cioè fa un angolo tanto piú grande coi fogli, di quanto il movimento relativo dell'osservatore è piú rapido. Si vede perciò che le sezioni che un mo-

mento fa sembravano profondamente differenti, l' una parallela, l' altra perpendicolare ai fogli, l' una rappresentante un aspetto simultaneo del mondo, l' altra la storia di una linea dello spazio, si trasformano in modo continuo l' una nell' altra. La velocità della luce che l' osservatore non può raggiungere, o in ogni caso non può superare, dà il limite dell' obliquità delle due specie di sezioni.

Non possiamo fermarci piú lungamente per dimostrare come questo schema, cosí felicemente trovato, permetta di dimostrare tutte le proprietà essenziali della geometria della Relatività del Minkowski. È appena necessario aggiungere che Minkowski non pensa a fotografare l' universo e in conseguenza a proiettare le sue tre dimensioni su due, ma che egli si rappresenta gli universi a tre dimensioni adattati gli uni sugli altri, il che naturalmente non è possibile che in una quarta dimensione. Lo schema dimostra bene come, collocando le une sulle altre le prove a due dimensioni, si ottiene un blocco a tre dimensioni, e come s' introduce questa terza dimensione che rappresenta il tempo e non ha differenze essenziali con le altre due.[1]

Se si esamina l' insieme della concezione di Minkowski si pensa involontariamente alla frase che Wagner mette sulla bocca di Gurnemanz che si rivolge al giovane Parsifal: "Tu vedi, o figlio, il tempo qui diventa spazio."

[1] Una rappresentazione, particolarmente piacevole, del tempo quale quarta coordinata dello spazio si trova in "Kleinen Schriften" del Dr. Mises (Gustavo Teodoro Fechner). Lipsia, 1875. Breitkopofs Härtel.

VIII

CONCLUSIONI FILOSOFICHE SULLA TEORIA DELLA RELATIVITÀ PARTICOLARE

La teoria della Relatività particolare, che abbiamo or ora accennato a grandi tratti, ha prodotto la piú viva sensazione, non solo nel mondo degli scienziati, ma anche in tutti gli ambienti, perché essa scuote le fondamenta delle nostre concezioni del tempo e dello spazio. Giammai fino ad ora si era pensato che il giudizio seguente: " Questa lunghezza portata su di una spranga rigorosamente rigida ha 10 centimetri " potesse avere un significato che non fosse assoluto. Non era balenato alla mente di alcuno il farne dipendere la validità o la non validità da una qualsiasi circostanza, come per esempio dallo stato di movimento di colui che enunciava questa affermazione. Prima non era venuto in mente a nessuno che due avvenimenti potessero essere simultanei o meno secondo l' osservatore, o che l' ordine della loro successione potesse essere per l' uno l' inverso di quello che è per l' altro. Enunciamo ancora una volta i fatti che hanno determinato la marcia rivoluzionaria della teoria della relatività. Le tre proposizioni:

1° La velocità della luce è costante in modo assoluto per qualsiasi osservatore,

2° I movimenti rettilinei ed uniformi di tutti i sistemi sono relativi gli uni rispetto agli altri,

3° Le nostre misure dello spazio e del tempo sono valevoli per tutti i sistemi.

sono incompatibili e conducono a contraddizioni matematicamente insostenibili. Poichè non si poteva rinunziare alle due prime, anzitutto per ragioni sperimentali, ed anche per ragioni filosofiche, non rimaneva che rinunziare alla terza, che non aveva motivi tanto seri da essere conservata.

Resterebbe da dimostrare che la relatività delle misure di tempo e di spazio equivale a quella dei concetti di spazio e di tempo. Per il fisico lo spazio e il tempo sono grandezze ausiliarie ch'egli adopera allo stesso titolo di altre per descrivere i fenomeni. Vi è dell'altro? Non spetta a lui occuparsene.

Quando Mefistofile dice:

Io qui ben riconosco l'uomo saggio!
Ciò che voi non toccate col dito si perde per voi nell'infinito!
Ciò che voi non stringete vi sfugge completamente!
Ciò che voi non potete sottomettere al calcolo non è vero secondo voi!
Ciò che voi non potete pesare non ha alcun peso per voi!
Ciò che voi non monetate voi lo giudicate senza valore!

i fisici, astrazion fatta del motteggio che corrisponde non solo alla opinione di Mefistofile ma anche a quella di Goethe e a parte il denaro che non è stato mai fatto per loro, devono riconoscere che queste parole sono giustificate e ca-

ratterizzano le loro concezioni. Planck, uno dei primi tra essi, l' ha detto un giorno molto esattamente: "Ciò che esiste è ciò che io posso misurare." Infatti per essi il peso è unicamente la cifra letta sulla bilancia, la temperatura ciò che il termometro segna, l' intensità di una corrente elettrica ciò che l' amperometro dà. Allo stesso modo lo spazio non è che la possibilità di collocarvi dei metri, il tempo la possibilità di usare il proprio orologio, e niente piú. In quanto a ciò che si nasconde dietro questi concetti, abbiamo visto a pag. 43, che ciò non ha per essi che un valore inventivo [1] e didattico.

I successi della fisica e delle tecniche derivate, successi che hanno lasciato lontano nell' ombra quelli di qualsiasi altro campo dell' attività umana, hanno dimostrato ad usura il valore di questi princípî in questa scienza.

Ma ciò che è convenuto bene per concetti come quelli del peso, della temperatura, dell' intensità di corrente, nozioni puramente fisiche, non può valere senza difficoltà, per concetti generali come il tempo e lo spazio, che non rappresentano la proprietà speciale dei fisici. Ci si può in ogni caso domandare se non si sia in diritto di mantenere a fianco del loro spazio sperimentale, il vecchio spazio assoluto per delle speculazioni matematiche e filosofiche, la sua principale funzione sarebbe di dare delle basi solide non solamente a queste speculazioni e alla sintesi interna, ma ad

[1] A rigor di termini l' inventiva è l' arte di fare delle scoperte. Einstein però usa questa parola in un senso differente. Una teoria, per lui, ha un valore inventivo quando dà un giudizio sul valore di una legge.

ogni ricerca sperimentale. Con questo noi arriviamo alla nostra ultima osservazione.

I rapporti reciproci della ricerca sperimentale e delle ipotesi filosofiche sull' universo non sono esattamente gli stessi nei due sensi. È cioè evidentemente desiderabile che la prima rimanga d' accordo con le seconde, che da queste essa riceva l' impulso e che per mezzo di esse si riallacci ad altre discipline intellettuali. È cosí che prima di Einstein, Mach ha trovato il principio di relatività basandosi su convinzioni filosofiche. Ma in quanto ai fini e alle direttive delle sue ricerche, ogni scienza non può riceverli che dalle sue proprie leggi e non deve basarsi altro che sui propri successi. Nel senso inverso la filosofia non può trascurare i risultati ottenuti da ciascuna scienza particolare; se essi sono abbastanza importanti e ricchi di senso, essa li deve accettare anche senza esservi costretti da ragioni di logica assoluta, modellandoli, se del caso, e fondendoli secondo i propri metodi. Se dunque la teoria della relatività deve dare alla fisica, come ben sembra, una nuova e durevole veste, le nostre idee filosofiche sul tempo e sullo spazio non possono non risentirne le conseguenze.

LA RELATIVITÀ GENERALE

Nel 1908 Massimo Planck diceva all' Università Colombia di New York che il principio della relatività superava in audacia tutto ciò che era stato fatto sino ad allora nelle ricerche scientifiche speculative e anche nelle teorie filosofiche della conoscenza; la geometria euclidea non era a paragòne che un gioco da bambini.

Queste superbe parole erano appena state profferite da un fisico, la cui autorità e competenza sono assolutamente incontestate, allorché Einstein si applicò alla teoria della Relatività generale, che per l' audacia del pensiero, oltrepassa la prima di quanto questa supera la vecchia fisica.

La teoria della Relatività particolare, della quale ci siamo occupati sino ad ora, era senza dubbio un edificio imponente per l' arditezza e la logica del suo insieme. Per il suo modo originale di presentare i concetti elementari dello spazio e del tempo, essa aveva avuto una grande influenza nei campi piú disparati; ma invano si era cercata l' esperienza che permettesse di scegliere tra essa e la teoria di Lorentz. Questa occasione non si è offerta che con la teoria della Relatività generale che ci si presenta come l' estensione

tutt' affatto naturale della sua sorella maggiore in età. Potevano condurre a ciò, come si vedrà ben presto, solo le idee profondamente relativiste di Einstein, e non le idee assolutiste di Loréntz e le sue ipotesi create in modo speciale per un caso particolare. Una verifica sperimentale della teoria generale può dunque essere considerata come decisiva tra Einstein e Lorentz.

Per capire di che si tratta ci è necessario ricordare le osservazioni dell'introduzione. Là parlammo di un principio di relatività dei moti, secondo il quale tutti i movimenti, considerati dal lato geometrico, non sono percettibili e concepibili altro che "relativamente" cioè in rapporto a dei corpi che non vi prendono parte. Al contrario le teorie di relatività fisica, tanto la teoria meccanica di Galileo, quanto la teoria elettromagnetica di Einstein, non ammettono altro che la relatività dei movimenti rettilinei ed uniformi; fino ad ora non si era mai messo in dubbio la natura assoluta di tutti i movimenti non rettilinei o non uniformi.

Un esempio ci permetterà di spiegarci meglio.

IX

LA ROTAZIONE DELLA TERRA

Nella maggior parte dei casi i movimenti della terra, sia la traslazione che la rotazione, possono essere considerati come rettilinei ed uniformi, la

loro curvatura è tanto debole da essere impercettibile per i brevi percorsi. Questa è la ragione per la quale nella vita quotidiana non la notiamo; Galileo l'aveva già dimostrata, come abbiamo visto a pag. 15.

Tuttavia vi sono dei fenomeni molto importanti che non si possono spiegare altro che con la differenza tra il movimento reale della terra e il movimento rettilineo; vengono riuniti sotto il nome di forza centrifuga. Ciascuno di noi ha visto le briciole di fango, aderenti ad una ruota in movimento, distaccarsi da essa ed essere lanciate all'infuori; noi tutti abbiamo sentito la trazione esercitata sulla mano da un oggetto che si fa girare rapidamente. Tutti i corpi sulla terra sono soggetti alle stesse azioni. In realtà il peso impedisce ch'essi siano lanciati via, ma esso diminuisce, secondo le regioni, di una quantità variabile, massima all'equatore, dove la velocità dovuta alla rotazione è massima, nulla ai poli dove questa velocità è nulla. Si dimostra facilmente questa variazione del peso sulla superficie terrestre, variazione la cui causa principale, tra parecchie altre, è quella che noi abbiamo or ora indicato; per esempio all'equatore la marcia degli orologi a bilanciere è lentissima, mentre gli orologi a molla non presentano questo fenomeno.

Si è già parlato della deviazione di un movimento che si effettui su di un percorso sufficientemente lungo e diretto da nord a sud o da sud a nord; ma l'effetto piú potente della rotazione della terra è il suo schiacciamento. La superficie del nostro pianeta è in gran parte ricoperta di

acqua, la quale non resiste all'azione della forza centrifuga per la sua debole coesione; quest'acqua s'accumula all'equatore e diminuisce ai poli. Se fosse possibile di fermare la nostra rotazione enormi masse d'acqua si precipiterebbero verso i poli e, mentre estese regioni di mari tropicali si prosciugherebbero, le zone polari ed anche una grande parte delle zone temperate sarebbero sommerse. Si è calcolato che di tutte le Alpi sole alcune cime emergerebbero: il monte Bianco, isola elevantesi appena 950 metri, la Jungfrau, piccolo scoglio di 40 metri di altezza; questi sarebbero le vestigia piú settentrionali d'Europa.[1]

Dunque gli effetti prodotti dalla rotazione della terra non mancano: si tratta solamente di spiegarli. Secondo la vecchia meccanica di Galileo, Newton e Huygens, la quale su questo punto non è stata scossa dalla teoria della relatività particolare, si deve ammettere che questi effetti si riferiscono alla rotazione della terra "in se stessa" cioè senza considerazione di corpi di riferimento; bisogna dunque pensare che essi continuerebbero a sussistere se l'insieme dei corpi celesti sparisse e se la terra restasse sola nelle solitudini dell'universo. A questa idea appunto Einstein si è attaccato; egli si è detto: in seguito a questa sparizione per mantenere la rotazione della terra non è necessario alcun fenomeno o aumento di energia o altro; essa continua tranquillamente a girare nello spazio vuoto, anche piú regolarmente, poiché le perturbazioni molto de-

[1] Secondo Martus "Geografia astronomica" 3ª edizione. Dresda e Lipsia 1904, pag. 419.

boli che genera la luna, per esempio, non si produrebbero piú; una mente relativista si deve quindi domandare in che cosa si differenzia questa rotazione, rispetto allo spazio vuoto, dalla rotazione dello spazio vuoto rispetto al globo e se bisogna attendere da questa rotazione un'azione sul globo stesso.

Per mezzo di queste riflessioni Einstein ne è arrivato a concepire movimento di rotazione, anch'esso come relativo, relativo cioè al sistema delle stelle fisse. Ma siccome, contrariamente ai movimenti rettilinei ed uniformi, la rotazione terrestre produce degli effetti fisici indubitabili, si è condotti a pensare che essi sono esclusivamente prodotti dal movimento relativo della terra; immaginiamo che la terra non giri attorno al suo asse rispetto alle stelle fisse, ma che invece siano queste che girino attorno ad essa, come precisamente pretendeva Tolomeo: dal nostro punto di vista, poiché il movimento relativo non è cambiato, tutti i fenomeni restano gli stessi. Qui bisogna fare un'osservazione. Non si ha evidentemente in questa concezione che una ipotesi puramente fisica e non una interpretazione matematica, filosofica di un fenomeno, come nella teoria della Relatività particolare in opposizione alle idee di Lorentz. È perché la relatività generale è forse piú facile a comprendersi della relatività particolare che l'ha preceduta; essa non si contenta di spiegare, ma porge conclusioni concrete sui processi reali della natura; ne consegue quindi ch'essa deve consentire un controllo sperimentale.

Come sarebbe ciò possibile nel nostro caso? Teoricamente il procedimento piú semplice e piú radicale sarebbe quello di sbarazzarsi del sole, della luna e delle stelle, di metterli da parte; se dopo si facessero sentire sulla terra come prima gli effetti della forza centrifuga, sarebbe la vecchia teoria assolutista che avrebbe ragione; ma se mancassero, sarebbe l'ipotesi relativista che la guadagnerebbe. Infatti non si sarebbero toccati che movimenti relativi e non movimenti assoluti; dato che gli effetti scomparirebbero, la teoria della relatività e l'ipotesi che ne è la base, sarebbero valevoli ed indubbiamente giusti.

Questa esperienza presenterebbe disgraziatamente alcune difficoltà pratiche. Come, nonostante tutto, verificare la nostra teoria? Einstein ha risposto a questa questione. Se il sistema delle stelle fisse, girando attorno alla terra vi sviluppa delle forze centrifughe, deve essere lo stesso per altre masse in rotazione, purché esse siano abbastanza considerevoli. Delle prove di verifica sulle grandi ruote motrici delle nostre macchine a vapore non hanno potuto, per la piccolezza degli effetti, permettere di decidere in un senso o nell'altro.

Newton si era di già posto il problema del significato assoluto o relativo della rotazione ed aveva tentato di rispondere ad esso con l'esperienza. Un recipiente pieno d'acqua era messo in rotazione per mezzo della torsione dei fili di sospensione; in principio, insino a che l'acqua non aveva preso il movimento del vaso, benché essa fosse in rotazione rispetto allo stesso, la

sua superficie rimaneva piana; poi essa saliva, come si sa, lungo le pareti; essa era allora in rotazione per l'osservatore, ma in quiete rispetto al vaso. Newton ne aveva dedotto il carattere assoluto del movimento di rotazione; Ernesto Mach ha avuto il merito di dimostrare che il vaso non può essere il corpo di riferimento conveniente e che, in conseguenza, la rotazione del sistema non si fa nello spazio assoluto. In realtà non si sa ancora se non si svilupperebbero delle forze centrifughe se un recipiente dalle pareti di spessore non di pochi millimetri ma di parecchie miglia, o anche l'universo intero, prendessero un movimento di rotazione in rapporto all'acqua.

X

INERZIA E GRAVITÀ

Nell'ultimo capitolo ci siamo occupati di un movimento uniforme, ma non rettilineo; ora esamineremo il caso di un movimento rettilineo, ma non uniforme. Ritorniamo all'ascensore che sale con dolcezza e regolarità perfette e del quale abbiamo già parlato. Tutti si sono accorti che non si può dall'interno constatare il suo spostamento durante il tragitto, salvo al principio e alla fine, a meno che non si guardi all'esterno e non si paragoni il suo stato di movimento con quello degli oggetti che non l'accompagnano, scala o altra parte dell'edificio; al contrario la

partenza e l'arrivo sono indipendenti da tutto ciò che si percepisce. Dal che la conclusione della teoria della relatività meccanica: Il movimento "uniforme" non ha che un significato relativo, ma il movimento non uniforme si concepisce in maniera assoluta, cioè senza corpo di riferimento. La stessa teoria della relatività particolare non aderisce a questo punto di vista. Guardiamo ora questi movimenti di partenza e d'arrivo un po' piú da vicino; nel primo la velocità cresce, nel secondo diminuisce; il primo è detto "accelerato", il secondo "ritardato" o "negativamente accelerato."

Ma poiché i corpi di riferimento sono inutili, in rapporto a che cosa si metteranno in evidenza o si misureranno questi movimenti accelerati o ritardati? Non vi è che una risposta: in rapporto allo spazio stesso. E di nuovo si ricadrebbe sullo spazio, principio fisico, indipendente, "assoluto", il che non sembra affatto soddisfacente. Einstein pone allora una questione. Questo movimento accelerato positivamente o negativamente, questo movimento vario non lo si può paragonare a niente altro, o sostituirlo con una altra cosa? Osserviamo e completiamo i nostri dati. Se il nostro ascensore si fermasse piú bruscamente del solito, noi saremmo lanciati in aria; tutti se ne possono rendere conto mediante una semplice prova con un bicchier d'acqua. Se l'arresto fosse un po' piú progressivo, sebbene sempre brusco, si avrebbe una specie di ondeggiamento, una liberazione momentanea dell'"attrazione terrestre", della gravità. L'inverso si produce alla partenza,

alla quale si risente la gravità ancor piú fortemente che alla fermata. Si vede che "i movimenti verticali accelerati hanno per conseguenza una variazione degli effetti dell'attrazione terrestre, effetti che secondo la natura di questi movimenti, possono essere aumentati, diminuiti, soppressi o superati."

Continuiamo queste riflessioni e domandiamoci a quale proprietà dei corpi si ricollegano il movimento non uniforme e la gravità terrestre. Per quest'ultima la si riconduce al "peso" dei corpi: una proprietà che noi attribuiamo agli uni, come l'oro e il piombo, in alto grado; agli altri, come l'ossigeno e l'idrogeno, in un grado meno elevato, ma che dev'essere considerata certamente come generale. In quanto al movimento non uniforme positivamente o negativamente ritardato, i suoi effetti dipendono evidentemente dall'inerzia, poiché a causa dell'inerzia i corpi tendono a conservare il loro movimento rettilineo ed uniforme, e oppongono alla sua variazione una resistenza piú o meno grande. Tutto ciò che sembra separare in modo cosí netto il movimento non uniforme dal movimento uniforme deriva da questo fatto. Nel nostro esempio è l'inerzia del nostro corpo che ci ha permesso di sentire immediatamente che il movimento non era uniforme. Siamo quindi condotti a ricercare le relazioni tra inerzia e gravità.

Qui ci è necessario chiedere uno sforzo al lettore che non ha familiarità con queste questioni. Gli è necessario a tutta prima capire bene la

differenza fondamentale tra inerzia e gravità, ma per convincersi subito, secondo le idee di Einstein, della loro intima identità. Tuttavia queste due fasi sono necessarie per afferrare tutta la portata di questa concezione e per capire ch' essa non ha nulla di evidente. L' inerzia e la gravità sono due concetti assolutamente differenti; della gravità noi non conosciamo altro che la gravità terrestre; essa non agisce che secondo la verticale, sull' orizzonte essa è fuori di causa. In quanto all' inerzia, che rappresenta la resistenza ad ogni cambiamento nello stato di movimento, la direzione è per essa assolutamente indifferente. Se noi vogliamo fermare una "pesante" palla in rapido movimento, poco importa ch' essa vada in salita, in discesa o in piano, il "peso" non c' entra per nulla, solo l' inerzia interviene. Invece se vogliamo sollevare la palla, senza tener conto della velocità del movimento, noi non abbiamo che da vincere la gravità e non l' inerzia. È essenziale notare che "l' inerzia" di un corpo gli appartiene naturalmente; al contrario il suo peso non esiste se non in quanto esiste un corpo attirante, in generale la terra; se ci immaginiamo trasportati su di un altro corpo celeste, i pesi di tutti i corpi sarebbero modificati, ma la loro inerzia non lo sarebbe affatto. Su certi piccoli pianeti noi potremmo senza alcun dubbio sollevare un vagone pesantemente carico di merci o una locomotiva, con lentezza certo, ma ci riuscirebbe tanto difficile arrestarli come sulla terra, anche se essi non andassero che ad una velocità molto moderata.

Come avviene dunque che in queste condizioni

l' inerzia e la gravità, nonostante la loro natura così profondamente differente, possono essere permutate, tanto che nel nostro esempio abbiamo parlato di una " pesante " palla, quando volevamo dire una palla " di grande inerzia "? È che l' inerzia e il peso sono proporzionali e che, in conseguenza l' uno può esser preso come misura dell' altro. In queste condizioni si comprende come nella vita corrente si possa dire che una sfera " pesante " non può essere fermata nella sua corsa così facilmente come una sfera leggera; il peso di un corpo è dato, in generale, dalla bilancia e da questo si conclude senz' altro sulla sua inerzia. Nell' esempio citato, dire che una sfera di " una grande inerzia " o avente " una grande massa " non si lascia arrestare che difficilmente, sarebbe più corretto che di parlare di peso, come si fa abitualmente. Ma siamo talmente assuefatti a vedere " inerzia " e " gravità " o " peso " e " massa " camminare di pari passo, che le confondiamo senza farvi attenzione. Naturalmente questo rapporto sussisterebbe anche sugli altri corpi celesti. Quand' anche la loro forza d' attrazione fosse tanto differente da quella della nostra Terra, che la nostra forza potesse sollevare una locomotiva, o, al contrario, fosse tanto debole da essere appena sufficiente a sollevare un dado dal suolo, non vi sarebbe nel fatto alcun che di cambiato, in quanto su quei corpi celesti i corpi più pesanti sarebbero anche, e nella stessa proporzione, i più inerti. Prendiamo per maggior chiarezza un paragone di grande attualità: si poteva credere prima della guerra che

un marco tedesco ed uno scellino inglese fossero equivalenti, identici anzi. In conseguenza del precipitare dei cambi, noi sappiamo che il rapporto tra la moneta tedesca e quella inglese è costantemente variabile e assolutamente indeterminato. Ma ciò non impedisce che ad un dato istante vi sia sempre proporzionalità fra le due monete; valga poco o molto il marco, io riceverò in tutti i casi per 200, 300, 400 marchi una quantità di denaro inglese 2, 3, 4 volte maggiore di quella che riceverei per 100 marchi. Allo stesso modo il rapporto tra l' inerzia e la gravità può variare secondo i luoghi, ma in uno stesso punto vi è proporzionalità assoluta tra di loro.

Una conseguenza ben conosciuta di questo fatto è che, astrazione fatta dalla resistenza dell' aria, tutti i corpi cadono con la stessa velocità sia che si tratti di una palla di piombo o di una piuma. Da che cosa proviene ciò? Sembrerebbe, dal momento che l' attrazione piú grande viene esercitata sul corpo piú pesante, che questo dovesse cadere piú velocemente; ma il corpo piú pesante è anche il piú inerte e oppone la resistenza piú grande alle variazioni di movimento, esso deve perciò mettersi in movimento piú lentamente. La " proporzionalità perfetta " tra l' inerzia e la gravità ha per conseguenza l' identità dei movimenti di caduta per tutti i corpi. Questa identità persisterebbe quindi su tutti gli astri.

Tutto questo, bene inteso, è conosciuto da secoli ed è familiare a tutti i fisici. Ma Einstein per il primo si è domandato se era giusto considerare una cosa tanto notevole e tanto generale, quale

questa proporzionalità della gravità e dell' inerzia come un semplice fatto, un nudo fatto dovuto al caso, o se non fosse necessario cercare di chiarirlo in attesa di poterlo spiegare, di utilizzarlo in una maniera qualsiasi, di fargli posto nella concezione fisica dell' Universo.

Si tratta infatti di cosa veramente notevole. Le altre forze agiscono sui corpi in maniera tutt' affatto differente. Una piccola pallottola di midollo di sambuco, caricata di elettricità, sviluppa forze elettriche considerevoli, mentre il suo peso è, al paragone, insignificate. Per una sfera di piombo caricata alla stessa maniera il rapporto è rovesciato. Il ferro e il nichel possono essere tutti e due magnetizzati, ma il primo molto piú del secondo. Di fronte al calore tutte le sostanze si comportano differentemente: è necessario molto piú calore per elevare ad una data temperatura un litro d' acqua che un litro di mercurio, che ha una massa e un peso ben superiori. Insomma in ogni dove noi guardiamo, esistono differenze; soltanto si corrispondono perfettamente le proprietà piú generali dei corpi: gravità ed inerzia. "Meravigliarsi" è, secondo Aristotele, il cominciamento di ogni filosofia; mentre il profano considera questo fatto tanto importante come qualche cosa di evidente che non richiede alcuna spiegazione, il fisico ne ebbe attratta l' attenzione, e prima della relatività generale è stato condotto ad una spiegazione soddisfacente nel quadro della relatività particolare.

Veniamo ora alla teoria di Einstein.

È l' inerzia che determina il movimento uniformemente vario; d' altra parte una proprietà

essenziale dell' inerzia è la sua proporzionalità al peso; ci si può dunque domandare se non sia possibile di rimpiazzare le variazioni del movimento con delle azioni di gravità e di spogliarle con ciò del loro carattere assoluto. Un esempio ci chiarirà questa proposizione alquanto astratta.

Ad Einstein si deve tale esempio, divenuto poi d' uso comune. Non si tratta che dell' ascensore elettrico o idraulico del quale ci siamo già tanto serviti, ma questa volta esso è infinitamente meglio collocato e su di un piano tutt' affatto grandioso. Il suo movimento non è piú in principio accelerato, poi uniforme, infine ritardato; è uniformemente accelerato in modo che di mano in mano è sempre piú rapido.

Tale ascensore è sulla terra, ma in un punto qualsiasi dello spazio libero, lontanissimo da ogni altro corpo. Non ci occuperemo della origine della forza che lo fa muovere, e supporremo sul tetto un gancio munito di una corda molto lunga che qualcuno tira con una forza costante. La velocità della cabina aumenta cosí incessantemente, come siamo abituati a vedere per i corpi in caduta libera, la cui velocità raggiungerebbe proporzioni fantastiche se il movimento continuasse molto lungamente e non fosse frenato dalla resistenza dell' aria. Per percorrere il diametro terrestre basterebbe a tali corpi una mezz' ora, qualche ora per superare un secondo-luce, tuttavia vi è sempre abbastanza posto nell' universo, anche se si vogliono immaginare queste esperienze su grande scala, poiché le stelle fisse sono in genere separate le une dalle altre da anni-luce. Quanto

a parlare di una direzione di movimento verso l'alto, in basso o in qualsiasi altro senso, ciò non ha alcun significato; non vi sono simili direzioni negli spazi celesti.

Supponiamo ora che nell'interno della nostra gabbia si trovi un fisico, munito di tutti gli apparecchi d'osservazione possibili, ma che non possa guardare all'esterno, o, se lo può, che non veda altro che lo spazio vuoto, in modo da non avere a sua disposizione alcun corpo di paragone. A quali conclusioni arriverà egli? Noterà che se lascia cadere degli oggetti, questi si muovono in principio lentamente, poi di mano in mano piú velocemente in una certa direzione, tutti con la stessa accelerazione. Tali corpi fanno ciò naturalmente, a causa della loro inerzia ch'essi oppongono all'accelerazione continua della cabina; a tale accelerazione, quindi, essi non prendono parte, e si muovono perciò relativamente alla cabina stessa. Per la stessa ragione, allorché la parete si oppone alla continuazione del movimento, i corpi sopradetti esercitano sulla parete stessa una pressione. Ma siccome i corpi prendono ad ogni istante la velocità crescente della cabina e mostrano inerzia solo relativamente all'aumento della velocità stessa, la pressione sulla parete non cresce ma resta invariata.

Allo stesso modo il movimento relativo dei corpi rispetto all'apparecchio resta esattamente lo stesso tante volte quante si ripete l'esperienza.

Che cosa dirà dunque il nostro osservatore nell'ascensore? Verosimilmente qualche cosa di questo genere: Io ho creduto di trovarmi nello spazio

libero, senza alto né basso né gravità. Era un errore, io lo vedo; io sono, molto evidentemente, soggetto alla gravità, in un campo di "gravità" o di "gravitazione", poiché tutti i corpi cadono verso il "basso", tutti "con la stessa velocità", ed esercitano una pressione sul suolo, esattamente come quando avevo l'abitudine di fare della fisica sperimentale sulla terra. E subito si crederà in dovere di determinare l'accelerazione della caduta dei corpi, la quale, in base alla nostra ipotesi, dipende dall'accellerazione secondo la quale la gabbia si muove sotto l'azione della forza esterna; egli tenterà cosí di determinare l'intensità del campo di gravitazione che esso s'immagina; e ne tirerà forse delle conclusioni sulla grandezza e la distanza dei corpi celesti che a suo avviso lo determinano. Per quante esperienze egli tenti, non troverà alcun altro risultato; s'egli osserva la tensione della corda, l'attribuirà al peso della gabbia e non alla sua inerzia, rallegrandosi anche che la corda ne impedisca la caduta. In poche parole, "in conseguenza della rigorosa proporzionalità tra l'inerzia e la gravità il movimento uniformemente vario può essere sostituito nei suoi effetti da un campo di gravitazione." Il nostro fisico non riconoscerà il suo errore se non avrà dei corpi di paragone, in rapporto ai quali egli si muoverà con un movimento accelerato, e a condizione che non dia loro un movimento accelerato di direzione opposta alla sua.

E che cosa osserverà egli se cade invece con

la sua gabbia su di un astro, la Terra per esempio? Proprio nulla. La gabbia ha un movimento uniformemente accelerato. come pure tutti gli oggetti che vi si trovano; detti oggetti, cadendo esattamente come essa, non hanno il piú piccolo movimento relativo. Essi ondeggiano in un punto qualsiasi dell' interno, e non esercitano alcuna pressione sulla superficie inferiore della gabbia, se si può ancora parlare di superficie inferiore, dato che praticamente non vi è alcuna differenza tra l' alto e il basso. Il nostro povero amico, che corre verso una spaventevole catastrofe, può avere tranquillamente l' illusione che tutto vada per il meglio e che egli si muova con un movimento uniforme nello spazio libero dove non vi è né gravità, né alto, né basso. Noi vediamo dunque che: "Il movimento accelerato e il campo di gravitazione che lo produce, hanno degli effetti che si compensano esattamente. Se il movimento accelerato non deve compensare il campo di gravitazione, ma rimpiazzarlo, cioè se si deve percepire un campo di gravitazione mentre non vi è che un movimento accelerato, questo movimento deve naturalmente essere altrettanto rapido di quello che produrrebbe il campo, ma in senso opposto." Esempio: noi siamo in un treno che parte bruscamente; a causa dell' inerzia del nostro corpo, che tende a rimanere in quiete, noi risentiamo questo movimento; ci è giocoforza, a causa di scosse ripetute, inclinare in avanti il nostro busto, fino a che il movimento sia dive-

nuto uniforme. Se il viaggiatore vuol dire che è rimasto in quiete, non ha che da immaginare una subitanea creazione di un campo di gravitazione orizzontale, agente verso l' indietro, che ha tirato in tale direzione la parte superiore del suo corpo in modo continuo, ma che è scomparso ben presto (nel momento in cui in realtà il movimento del treno diveniva uniforme). Ben inteso, non bisogna immaginarsi che l' apparizione e la sparizione subitanee di tali campi di gravitazione orizzontali siano possibili fisicamente, senza altre condizioni, ma non si tratta qui che della compensazione del nostro movimento. Questo esempio ci dimostra ancora una volta che, essendo il movimento diretto verso l' avanti, il campo di gravitazione equivalente ha dovuto essere immaginato diretto verso l' indietro; a tale movimento in avanti, solamente, esso avrebbe prodotto un movimento precisamente opposto a quello che ha avuto effettivamente luogo. Si verifica esattamente l' inverso se il treno, frenando per esempio, rallenta, poi finalmente si ferma. Il nostro viaggiatore può ancora ostinarsi nella sua maniera di vedere, ed affermare che è rimasto in quiete, a condizione ch' egli ammetta un campo di gravitazione che produceva un' accelerazione positiva del treno verso l' avanti, mentre che in realtà l' accelerazione è stata un' accelerazione negativa, un rallentamento. Non è difficile vedere che il campo di gravitazione del movimento, non solo è di direzione opposta, ma anche esattamente uguale a quel campo.

Come si può misurare l' intensità di un campo

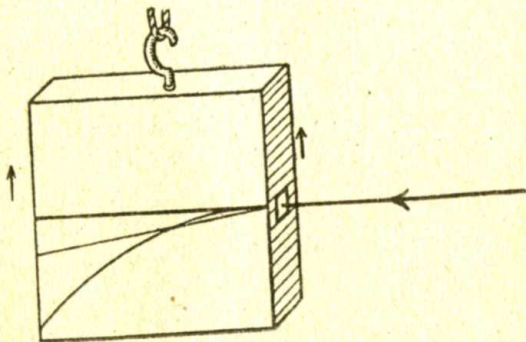
di gravitazione? Evidentemente non per mezzo della velocità del movimento ch' esso produce; poiché sotto la sua influenza essa aumenta senza tregua, e può prendere, nel corso del tempo, qualsiasi valore. Si dà dunque la velocità raggiunta al termine di un secondo. Sulla terra è di circa 10 metri, 9,81 m. nelle nostre regioni; è questo dunque il numero che caratterizza il campo di gravitazione terrestre; sul sole tale velocità raggiunge 270 metri, sulla luna m. 1,66. I corpi cadono dunque sul sole piú velocemente che sulla terra, sulla luna piú lentamente.

XI

LA TRAIETTORIA CURVA DEI RAGGI LUMINOSI

Da quanto si è esposto si è potuto trarre una obiezione nella quale si è trovato il miglior sostegno a tutta la teoria.

Ritorniamo al nostro fisico nella sua cabina, e ammettiamo che attraverso ad una finestra gli arrivi dall' esterno un raggio luminoso inviato, per esempio, da una stella fissa molto lontana. Che cosa osserverà egli? Abbiamo dimostrato l'esistenza di una aberrazione causata dal movimento della cabina; tuttavia ciò non cambia nulla alle sue conclusioni, poiché, se egli vede la stella in una direzione differente da quella in cui la vede un osservatore fisso, egli ritiene naturalmente la sua direzione come la giusta e non ne trae alcun' altra conseguenza nel suo stato di mo-

vimento. Ma la velocità della cabina non resta costante, aumenta invece sempre piú. Se noi ammettiamo che, anche nel breve intervallo che la luce impiega per attraversarla, questo aumento sia sensibile, ne deduciamo di conseguenza un aumento dell' aberrazione; il raggio mentre attraversa la camera cambierà di direzione; in altri termini apparirà curvato all' osservatore. E qui,

naturalmente, vi è posto per una obiezione contro la concezione dell' ultimo capitolo: se la cabina è in movimento accelerato, il raggio luminoso si curva, ma non si è giammai pensato a nulla di simile per una cabina in quiete in un campo di gravitazione. Sarebbe quindi possibile stabilire una distinzione che distruggerebbe definitivamente l' equivalenza che si supponeva completa, tra l' azione di un campo di gravitazione e quella di un movimento accelerato. Einstein, trovando questa conclusione insostenibile, ha enunciato l' ipotesi inversa: "I raggi luminosi sono incurvati da un campo di gravita-

zione nella stessa maniera che dal movimento accelerato equivalente."

L'importanza di questa concezione deriva dal fatto ch'essa offre la possibilità di una verifica sperimentale immediata. È sufficiente far passare un raggio luminoso in un campo di gravitazione e vedere se vi si incurva. Ma bisogna ben persuadersi che non si devono aspettare effetti rilevanti; al contrario la curvatura, cosí ottenuta, e la deviazione in rapporto alla prima direzione non possono raggiungere, in qualsiasi circostanza, che dei valori molto deboli. Non lesiniamo, ed immaginiamo una cassa di 300.000 chilometri, in modo che la luce impieghi esattamente un secondo per attraversarla. Paragonata alle dimensioni dell'universo, sarebbe sempre una ben piccola cosa; dalle stelle fisse, anche le piú vicine, non si potrebbe vedere il nostro apparecchio, anche fosse di una bianchezza abbagliante. Di piú supponiamo che su di essa agisca una forza tanto colossale da farle raggiungere in un solo secondo, dallo stato di quiete, la velocità della terra, cioè 30 chilometri. Ben inteso questa velocità aumenterebbe di altrettanto ogni secondo. In queste condizioni il raggio luminoso avrebbe alla sua entrata nella cabina un'aberrazione nulla; alla sua uscita avrebbe raggiunto il valore che corrisponde alla velocità della terra e che abbiamo indicato a pag. 79 cioè $^1/_3$ di minuto, il $^1/_{100}$ del diametro apparente della luna o del sole.

Che ne è esattamente nella realtà? Si vedrà che anche questo angolo di deviazione non si può raggiungere cosí presto, e purtuttavia tale angolo

er molto tempo ancora non sarà considerato
ome abbastanza grande. Infatti non vi sono in
atura campi di gravitazione di una intensità
anto formidabile come quella che noi abbiamo
mmesso. L'attrazione che il sole esercita su di
un punto della sua superficie è all'incirca 28
volte quella che la terra esercita su di un punto
della propria; un corpo in caduta libera, percorre
sulla terra m. 4,90 nel primo secondo e 135 metri
sul sole; la velocità di caduta libera aumenta
presso di noi, di m. 9,81 al secondo, di m. 270
sul sole; il campo di gravitazione del sole non
sarebbe quindi il $^{1}/_{100}$ di quello che noi abbiamo
supposto. E questo calcolo poi non è valevole
che in prossimità immediata della superficie solare; ad una distanza di un raggio la gravitazione
è diminuità di $^{3}/_{4}$. Le condizioni sono piú favorevoli in ciò che concerne l'estensione del campo
nello spazio. Abbiamo ammesso 300.000 chilometri come larghezza della gabbia; il diametro
del sole raggiunge 1.400.000 chilometri, 4 o 5 volte
tale distanza, e il campo si fa sentire, benché
affievolito, naturalmente, a distanze ancora piú
grandi. Questo rapido calcolo, piuttosto questa
valutazione, per quanto grossolana essa sia, dimostra abbastanza che, per le nostre deviazioni
noi non potremo sperare che angoli molto piccoli, appena al limite delle grandezze percettibili.
Non si può pensare a mettere in evidenza la
curvatura di un raggio luminoso per mezzo della
luna, e ciò è deplorevole, poiché si avrebbero numerose occasioni di osservazione. Siamo obbligati a rivolgerci alla deviazione attraverso il

campo di gravitazione piú forte che noi conosciamo, quello del sole. Ci è necessario quindi osservare una stella, che trovandosi in realtà molto al di là del sole, ci appaia molto vicina ad esso, ed i raggi della quale, per arrivarci, debbano attraversare la parte piú intensa del campo solare. Ora, si sa che di giorno, ed anche lontano da questo non se ne può vedere alcuna. Benché l'osservazione sia facilitata dall'impiego di strumenti (col loro aiuto infatti non vi è difficoltà ad osservare delle stelle in pieno giorno) non si è tuttavia ancora in grado di risolvere il problema; è necessario quindi attendere l'occasione di un ecclissi totale di sole, durante il quale, la sua luce troppo intensa sia mascherata dalla luna.

Per disavventura gli ecclissi totali di sole sono, com'è noto, molto rari. Dopo l'inizio della relatività generale, non se ne ebbero che due: il primo, nell'estate 1914, doveva essere osservato da una spedizione tedesca inviata a tal fine nel sud della Russia; essa però a causa dello scoppio della guerra non poté disgraziatamente fare le sue osservazioni; il secondo, nel maggio 1919, condusse alla verifica ben conosciuta dei calcoli di Einstein.[1] Ne riparleremo piú avanti.

[1] Vi fu in seguito un altro ecclisse solare: il 20 settembre 1922. Le misure dello spostamento delle posizioni stellari sulle lastre fotografiche ottenute durante tale ecclisse sono, a quanto ha annunziato il Prof. W. W. Campbell, Direttore dell'Osservatorio di Lick sul Monte Hamilton in California, in buonissimo accordo con i calcoli basati preventivamente sulla teoria della relatività. È quindi la seconda volta che la deflessione dei raggi stellari nel campo gravitazionale del sole viene confermata dalle osservazioni eseguite durante un ecclisse totale. (N. d. T.)

XII

NEWTON ED EINSTEIN

Come abbiamo visto, la teoria della relatività modifica le nostre idee sulla misura del tempo e dello spazio. Per il passato queste grandezze venivano considerate come invariabili o "assolute;" oggi la teoria della relatività, anche quella della relatività particolare, ci insegna a considerarle come dipendenti dalla velocità e quindi come "relative." Ora, le grandezze di tempo e di spazio sono le grandezze fondamentali elementari della fisica, e servono, a loro volta, a definire un certo numero di altre grandezze. Sotto questo riguardo vi è un campo tutt' affatto particolare, quello della meccanica; il concetto di "velocità" è fondamentale per questa scienza: per velocità s' intende lo spazio percorso durante l' unità di tempo. Se la teoria della relatività cambia i numeri che misurano lo spazio e il tempo, cambia di conseguenza anche quello che misura la velocità, e questo cambiamento, a sua volta, porta quello di altre grandezze non meno fondamentali. In altre parole, la meccanica tutta è attratta dalla teoria della relatività, e si parla di una meccanica "relativista" che viene contrapposta alle vecchie teorie della cosí detta "meccanica classica."

Quale può essere l' importanza delle modificazioni pratiche prodotte da queste novità? Sappiamo ch' esse saranno tanto piú sensibili, quanto

piú grandi saranno le velocità delle quali si tratterà. Ora, le piú grandi velocità della materia in movimento che la fisica conosca, sono, da una parte quelle delle particelle dei raggi catodici e dei raggi β del radium, dall'altra quelle dell'astronomia. I primi movimenti sono straordinariamente piú rapidi dei secondi, ma non si possono mettere in evidenza con misure immediate; è necessario ricorrere all'aiuto di una teoria. Le conferme della teoria della relatività ottenute per mezzo dello studio di tali movimenti, possono avere una certa importanza, sopratutto dato il loro numero, ma esse lasciano desiderare un'esperienza immediata, tangibile per cosí dire, che solo dall'astronomia può essere data.

Ci è necessario studiare la questione un po' piú da vicino. L'astronomia c'insegna a distinguere due specie di movimenti, la rotazione diurna della volta celeste, e la rivoluzione piú lenta dei pianeti in questa volta. La prima, che si riproduce quotidianamente con una precisione assoluta, non offre che pochi appigli a sviluppi matematici; essa è stata ben spiegata con la rotazione della terra attorno al suo asse, come ha dimostrato Copernico. Invece i movimenti dei pianeti hanno sempre posto due problemi agli studiosi; bisognava cioè prima descriverli con molta precisione per poter calcolare, con la maggior approssimazione possibile, la posizione di ciascun pianeta ad ogni istante; e poi darne le cause, ricondurle alle leggi conosciute dei movimenti, in altri termini, creare una meccanica celeste. Il primo problema ebbe da Keplero la prima soluzione soddisfacente; la piú

importante delle sue leggi enuncia che i pianeti si muovono ciascuno in un piano, secondo una ellissi, della quale il sole occupa un fuoco; una seconda legge permette di calcolare l'istante nel quale ciascun pianeta raggiunge un punto qualsiasi di quest'orbita. Per quanto sbalorditiva sia tanta opera, dovuta ad un solo uomo, e che rappresenta per l'astronomia l'equivalente di un lavoro di millecinquecento anni, essa lasciava ancora due questioni pendenti. In primo luogo, i movimenti di tutti i pianeti mostravano, in confronto alle leggi, delle piccole deviazioni, le " perturbazioni," che già lo stesso Keplero conosceva in parte, ma che non si poterono notare abbastanza finché l'introduzione dei cannocchiali non aumentò in modo straordinario la precisione delle misure astronomiche. In secondo luogo, Keplero enunciava le sue leggi non altrimenti che come fatti; era deplorevole non poterli dedurre teoricamente da una legge piú alta e piú generale.

Newton colmò queste due lacune con una perfezione assoluta. Egli ricondusse tutti i movimenti planetari a due grandi cause, quelle che abbiamo indicate nel capitolo X: l'inerzia e la gravità. Se i pianeti non obbedissero che all'inerzia, si allontanerebbero sempre dal sole seguendo delle traiettorie rettilinee; se essi non obbedissero che alla gravità, seguendo la gravitazione del sole, cadrebbero sul sole; l'azione simultanea, il giuoco ritmico di queste due cause fondamentali, dà esattamente le traiettorie di Keplero, come Newton ha dimostrato con un calcolo di cui egli stesso ha trovato il metodo. Quanto

alle deviazioni, alle perturbazioni, esse provengono semplicemente dal fatto che il sole e il pianeta che vengono considerati non sono unici nel sistema planetario; che anzi gli altri pianeti esercitano anch' essi delle azioni di gravitazione sui loro fratelli. Citiamo una di queste perturbazioni: se noi congiungiamo con una retta il punto della traiettoria piú lontano dal sole e il piú vicino ad esso, noi otteniamo l' asse maggiore dell' ellissi o la linea degli absidi. Le linee degli absidi non restano fisse nello spazio; esse soggiacciono ad una lenta rotazione, che cambia a poco a poco la posizione della traiettoria. Siccome il punto piú vicino al sole si chiama perielio, si designa anche questo cambiamento col nome di spostamento del perielio.

Le conseguenze della legge di Newton sono state veramente straordinarie. Essa divenne la pietra angolare dell' astronomia, che ne fu in gran parte la semplice applicazione e che per la sua perfezione sopravanzò di molto tutte le altre scienze. Grazie ad essa si sono potuti prevedere col calcolo, molto anticipatamente e con una precisione incredibile, milioni di osservazioni che l' esperienza ha confermato in tutti gli osservatorî della terra. Il suo piú grande successo fu la scoperta del pianeta Nettuno, di cui Leverrier rivelò l' esistenza, e di cui calcolò la posizione basandosi sulle perturbazioni esercitate sul vicino pianeta Urano. E l' aver ritrovato, per opera di Gauss, il piccolo pianeta Cerere che, già scoperto, era stato perduto nei raggi del sole, è certo per la legge di Newton un successo di non minore importanza. Cosí la

legge di Newton divenne sempre piú il modello delle leggi naturali, e quando uno scienziato era tentato a dubitare del valore delle nostre scienze e sopratutto della possibilità di conoscere la natura, gli era sufficiente pensare ad essa per veder sparire tutti i suoi dubbi. Per un secolo e mezzo, fino alla scoperta del principio della conservazione dell'energia la scienza non ha avuto nulla da metterle a raffronto.

Tuttavia la legge di Newton aveva anch' essa i suoi difetti teorici e pratici. Praticamente, vi erano delle osservazioni ch' essa non poteva spiegare perfettamente; tali osservazioni erano però, a dire il vero, molto rare, e le discordanze deboli. Teoricamente essa rimaneva come una specie di grandiosa pietrificazione degli antichi tempi, in mezzo ai perfezionamenti incessanti della fisica portati dal progresso; da una parte non la si poteva far derivare da un principio superiore; dall' altra essa si riferiva alle azioni a distanza, cioè alla trasmissione istantanea delle forze, senza considerare il mezzo intermediario, mentre in altre parti della fisica, dopo Faraday specialmente, si era arrivati ai piú bei risultati negando appunto queste azioni. Aggiungiamo infine che essa supponeva uno spazio e un tempo assoluti. I suoi straordinari servigi rendevano penosa la posizione dei fisici a suo riguardo. Dato che nell' immenso campo dell' astronomia si riscontrava una discordanza, si cercava qualche circostanza accessoria che permettesse di ristabilire l' accordo tra la teoria e l' osservazione. Nella maggior parte dei casi questo procedimento è

riuscito meravigliosamente; il migliore esempio ne è la scoperta di Nettuno, che noi abbiamo già ricordata. L'accelerazione lunare, che fa avanzare il nostro satellite di dieci secondi ogni secolo sulle previsioni, è stato un altro rompicapo; essa è ora spiegata in maniera abbastanza soddisfacente. In realtà non rimaneva che un disaccordo insolubile: lo spostamento del perielio di Mercurio è superiore di quarantatrè secondi per secolo, secondo i calcoli di Leverrier, in confronto di quello che dovrebbe essere secondo la teoria di Newton; per dare un'idea di quest'angolo ricordiamo ch'esso rappresenta, a un di presso, il diametro apparente di un millimetro visto da una distanza di cinque metri; è di questa quantità che in cento anni aumenta la differenza fra la teoria e l'osservazione. Si tentò in principio il metodo che era riuscito per Nettuno, si cercò un nuovo pianeta, la cui azione di gravitazione avrebbe prodotto la perturbazione in questione. Siccome esso doveva essere ancor piú vicino al Sole che non Mercurio, la cui osservazione è già resa molto difficile dal fatto di questa vicinanza, era possibilissimo che fosse passato inosservato. Tuttavia non si è mai potuto trovare questo pianeta, per il quale si teneva già pronto il nome di Vulcano.

Noi non possiamo che accennare a grandi tratti il metodo seguito da Einstein, e che doveva coronare tutte le sue fatiche. Egli non ha cercato di ritoccare la legge di Newton nemmeno in qualche particolare, ma ha seguito, in modo del tutto indipendente, una via affatto nuova. Ha proceduto deduttivamente, cioè, avendo posto dei principî

generali che dovevano essere valevoli in tutte le circostanze e ha cercato di dedurne la sua legge. Il primo di questi principî era un principio di relatività completa; egli considerava come relativi non solo i movimenti rettilinei ed uniformi, ma tutti i movimenti. In questo modo la fisica ritrovava il principio di relatività cinematica, del quale abbiamo parlato in principio, e che era stato abbandonato tanto dalla teoria meccanica che dalla teoria della relatività particolare di Eistein.[1] L' idea essenziale per mezzo della quale Einstein ottenne questo risultato fu l' avvicinamento dell' inerzia e della gravità, sul quale già ci siamo intrattenuti: egli riassume in uno solo i due fatti fondamentali della meccanica. Di piú egli abbandona completamente le azioni a distanza, cercando l' azione che un dato "stato" esercita nel suo vicinato immediato spaziale e cronologico. Infine, partendo da questo, appoggiandosi su di un certo numero di ipotesi matematiche, e procedendo con metodi puramente matematici, egli è riuscito a porre la nuova legge fondamentale della meccanica. Questo metodo, già impiegato nella teoria della relatività particolare, e che consiste, sulla base di principî generalissimi si potrebbe quasi dire filosofici, nel dedurre delle leggi col calcolo, ha qualche cosa di seducente per il matematico. Non perderemo tempo a parlare

[1] Naturalmente non si può parlare di una confusione da parte di Einstein tra la dinamica e la cinematica; ciò tuttavia ha fatto Lenore Ripke-Kühn in un' opera alquanto pretenziosa: *Kant contra Einstein* (Erfurt. 1920). Questo appunto non sarebbe comprensibile altro che nel caso in cui Einstein non avesse tentato di stabilire le leggi dei movimenti la cui esistenza divide nettamente la dinamica dalla cinematica.

delle enormi difficoltà che vi erano da sormontare. Einstein ha dovuto bistrattare, piú che non nella Relatività particolare, le misure ordinarie dello spazio e del tempo per poter rimanere in accordo completo con i principî generali. Il suo spazio, considerato dal punto di vista concreto, ha, quando lo si paragona allo spazio abituale, qualche cosa di oscuro e di contorto: la traiettoria curva dei raggi luminosi, della quale abbiamo già parlato, ne dà una buona idea, ma ci risparmia anche timori esagerati. Benché nel nostro esempio il campo di gravitazione sia cento volte superiore al piú intenso che noi conosciamo, cioè quello del sole, su 300,000 chilometri un raggio non si incurva che di 21 secondi, l'angolo sotto il quale si vede un millimetro a 10 metri. Su distanze piú comuni noi quindi non abbiamo nulla a temere per il nostro spazio rettilineo o per la forma delle nostre membra. Con questa considerazione si può rispondere ad una questione: se veramente si ritorna al principio di relatività cinematica, è permesso di considerare una macchina in movimento come in quiete, e l'universo circostante come in movimento, senza contraddizione con le leggi naturali? Sí certamente, ma dovremmo risolverci ad introdurre delle misure del tempo e dello spazio varianti successivamente e cosí complicate che non potremmo piú riconoscere il nostro buon vecchio spazio e il nostro buon vecchio tempo, e il piacere di una simile stranezza scomparirebbe presto.

Passiamo ora al risultato della teoria di Ein-

stein: per principio, essa non considera, come abbiamo visto, che la vicinanza immediata; per applicarla a tutto un campo si deve fare a tutta prima un calcolo complicato, una "integrazione." Il teorema perde allora la forma ermetica e un po' meschina della legge di Newton. In quanto al calcolo, all'"integrazione," non si può farla con una precisione matematica completa ed assoluta, essendovi sempre posto per dei perfezionamenti. In una prima approssimazione si trova.... la legge di Newton. Tutte le eccellenti prove di questa legge insigne, che noi abbiamo enumerate, la teoria di Einstein può rivendicarle con lo stesso diritto. Inoltre, se si spinge piú lontano il calcolo della formula fondamentale, si trova precisamente lo spostamento del perielio; tale spostamento esiste per tutti i pianeti, ma non raggiunge un valore osservabile se non in quello piú prossimo al sole: Mercurio; e questo valore coincide quasi esattamente con quello già da lungo tempo richiesto dall'osservazione. In realtà sono dei risultati sbalorditivi, di fronte ai quali il sacrificio delle vecchie idee sul tempo e sullo spazio, già fortemente scosse dalla relatività particolare, non appare troppo penoso.

XIII

L'ACCIDENTE FERROVIARIO

Nelle discussioni sul principio della relatività generale l'accidente ferroviario ha avuto una grande parte e ha dato luogo a vive ed anche

ardenti controversie. Si è dichiarata nettamente assurda la conclusione necessaria del principio della relatività generale, la possibilità cioè che un treno, il quale abbia avuto un accidente in piena corsa, sia rimasto in quiete, che solamente gli oggetti circostanti si siano mossi, e che, d'altra parte, nonostante ciò, questi ultimi, dopo la catastrofe, siano rimasti intatti mentre tutto è andato in briciole dentro il treno. La cosa in se stessa non è difficile a spiegarsi: ecco come si presenta se si vuole considerare il treno come un sistema fisso, il che è consentito, dal punto di vista della relatività generale; il treno è immobile, la locomotiva verso l'est, per esempio. Tutta la contrada circostante, le rotaie, gli alberi, le case, si spostano rispetto ad esso con grande velocità verso l'ovest.

Un campo di gravitazione nasce allora nella direzione dell'est, cioè tale che l'est e l'ovest ne rappresentano rispettivamente il basso e l'alto. La contrada che sino ad ora si era mossa in senso inverso a quello che prende questo campo, verso l'alto se si vuole, è arrestata nel suo movimento. Non appena essa è tornata in quiete, il campo di gravitazione scompare; l'alto e il basso riprendono la loro posizione normale: la contrada è ritornata immobile. La caduta del treno verso l'est è stata impedita da un ostacolo esterno, per esempio una pietra sulle rotaie; non è stato evidentemente lo stesso per gli oggetti che vi erano contenuti: viaggiatori, bagagli, etc. sono stati scaraventati gli uni contro gli altri. O anche: solo la caduta della locomotiva è stata arrestata, i vagoni son caduti su di essa, poiché non

ne erano impediti né da un ostacolo esterno, né dal loro movimento anteriore. Ed ecco tutta la spiegazione.

Ma non si può negare che, irreprensibile dal punto di vista logico, essa non è convincente. Si possono confutare tutte le obiezioni, non si può però forzare il sentimento intimo di accettazione. Vorrei perciò sviluppare due serie di idee che, io credo, potranno contribuire a togliere le ultime difficoltà, e di cui la prima si rivolge alla maniera di pensare dei non relativisti.

Basta aver studiato un po' di matematica per sapere che un ragionamento conduce spesso a parecchie soluzioni, delle quali, tuttavia, una sola può essere utilizzata nelle condizioni del problema. Per esempio, un' equazione deve dare un numero di persone, e mentre si ottiene un numero positivo, se ne ottiene anche uno negativo o frazionario che non ha senso. In geometria analitica si incontrano spesso delle "radici immaginarie" le quali, a prima vista, non hanno alcun significato concreto geometrico, e cosí è in molte altre applicazioni. In tutti questi casi, ciò nonostante, è molto istruttivo sapere che i risultati ottenuti, se non trovano applicazione pratica immediata, non sono tuttavia al di fuori della logica matematica. Io sinora non ho mai inteso dire che si sia rimproverato ad un metodo matematico soluzioni che oltrepassano i bisogni della pratica.

Per altro, l'utilità pratica è un concetto molto relativo. In matematica noi constatiamo in ogni dove uno sforzo per darle una larga interpretazione: noi parliamo di distanze negative, di aree

negative, nozioni che, anch' esse, a tutta prima sembrano al di fuori del concreto, e che non sono state introdotte che per spiegare i risultati dei calcoli.

Basandoci sulle nostre concezioni delle leggi naturali, siamo condotti a giudicare intorno al loro valore in base alla loro attitudine a rispondere a tutte le nostre questioni, il che noi vogliamo anche fare per le nostre ipotesi sulla quiete e sul movimento; ma io non posso rimproverare tuttavia ad una legge naturale di darmi di piú di quanto io voglio utilizzare. Sotto il pretesto che non contraddice brutalmente queste leggi, una rappresentazione, caricata di ogni sorta d' ipotesi annesse, non è necessariamente l' immagine della realtà. Sono io forse obbligato a giudicare a priori qualcuno come persona onórevole per il solo fatto ch' egli non ha avuto mai a che fare col codice penale?

E d' altra parte che cosa si intende esattamente per "reale"? Dato che si concepisce un determinato stato di quiete come la schietta quiete, la quiete "vera," si suppone uno spazio assoluto, che la teoria della relatività ha per scopo di rendere superfluo.

Il secondo ordine di riflessioni ci avvicina, forse ancor di piú, allo spirito del principio di relatività. La miglior cosa per rappresentarci la relatività di un movimento è di figurarsi un sistema d' ordine superiore, nel quale l' oggetto in questione è effettivamente in quiete. Se si vuol considerare il treno in marcia come in quiete non si deve fare altro che pensare che esso viaggia

sulla terra in movimento, e nulla m'impedisce di ammettere che il suo movimento e quello della terra si annullano, il che mi permette, con maggior ragione ancora che per la stessa terra, di ammettere che il treno non si muove. È vero che nei movimenti non uniformi è piú difficile immaginarsi un sistema d'ordine superiore nel quale il nostro treno sia ad ogni istante immobile. Tale sistema non può essere quello delle stelle fisse, poiché non si può evidentemente figurarsi il nostro treno che resti fermo per molto tempo in rapporto ad esse. Ci è necessario costruirne uno piú vasto ancora: immaginiamo uno Spirito potente, che si interessa delle questioni di fisica e che si sposta nell' universo con un' impalcatura colossale, la quale si spinge molto al di là delle stelle fisse. Questa impalcatura, supposta imponderabile, porta una graduazione in chilometri e in metri visibili da lontano, e dei piccoli esseri che fanno delle osservazioni. Il potente Spirito ne regola la marcia esattamente su quella del treno, in modo che questo appare in quiete se lo si osserva dalla impalcatura, mentre al contrario tutta la terra appare in movimento. Nell' istante in cui comincia la catastrofe, lo Spirito ferma la sua impalcatura, in modo ch' essa rimane in quiete rispetto al treno. I piccoli osservatori, che si attengono strettamente alle loro graduazioni, notano naturalmente un formidabile movimento del sole, della luna e delle stelle nel senso del movimento primitivo dell' impalcatura. Infatti, sole, luna e stelle si muovono indifferentemente in tutte le direzioni, ma la componente del loro proprio mo-

vimento, direttamente opposto a quello dell'armatura, scompare all'arresto di quest'ultima.

Come spiegano i nostri osservatori i fenomeni che essi constatano nel treno? Essi non possono riferirli all'inerzia, perchè il treno, rispetto a loro, è sempre in quiete. Essi ammetteranno quindi un campo di gravitazione che ha portato in quiete la regione circostante, che prima era in movimento, ed ha tutto sconvolto nel treno. Quanto alla causa dell'apparizione di questo campo di gravitazione, sarà evidentemente il movimento relativo di tutti i corpi celesti, rispetto al loro sistema, che essi percepiranno all'istante della loro brusca fermata.

Noi non citeremo che alcune delle obiezioni possibili. Si potrebbe dire a tutta prima che questa azione repentina di corpi celesti, benché molto lontani, non è che un'azione istantanea a distanza, precisamente incompatibile con la nuova teoria. Rincresce di non poter disporre piú del nostro vecchio etere che ci permetterebbe di rappresentare facilmente la concezione di Einstein; potremmo immaginare che i corpi celesti lontani creano in esso delle tensioni insensibili finché il movimento è uniforme, e sensibili appena esso non è piú tale, il che permetterebbe l'apparizione improvvisa di un campo di gravitazione. Siccome noi non abbiamo piú etere, ci è necessario ricondurre tutto al "campo;" ma in fatto questo non cambia nulla. D'altro canto Einstein ha ripreso il vocabolo etere, per dare una designazione piú concreta alle proprietà variabili di questo campo, ma non si può riconoscere ad esso, come del

resto neanche prima, alcuna proprietà materiale. Molti relativisti di valore non dissimulano il loro disappunto di vedere " l'ospite testé espulso " fuori della fisica, introdurvisi nuovamente. Non sono stato certo io quello che per il primo ha fatto notare con una crudele facezia che sarebbe sufficiente cambiarne il nome. Noi potremo anche dire che il movimento non uniforme della nostra armatura non ha luogo solo rispetto alle attuali posizioni e agli attuali movimenti delle stelle, ma anche rispetto alle posizioni e movimenti precedenti. Se dunque noi vogliamo che il nostro treno rimanga in quiete, il che obbliga ad ammettere un movimento non uniforme delle stelle, noi possiamo immaginare che questo movimento ha avuto luogo prima, nell' istante cioè in cui le stelle si trovavano là dove i viaggiatori le hanno viste durante la catastrofe, e benché l'azione sul treno sembri istantanea, non vi è piú alcun ostacolo al principio delle azioni ravvicinate, non vi sono piú forze a distanza che agiscano istantaneamente.

Si potrebbe ancora dire: è ben straordinario che quello Spirito calcoli e arresti la sua armatura precisamente nel momento stesso in cui il treno incontra la pietra sulle rotaie. Ma noi possiamo immaginare che il movimento non uniforme dell' armatura si produca in un qualsiasi altro istante. Allora il treno, le rotaie, la regione intera obbediranno, senza incontrare ostacolo, al nascente campo di gravitazione, il treno cominciando subito a cadere, le rotaie e tutta la contrada circostante rallentando a lor volta il mo-

vimento, che è ora diretto verso l'"alto", del nuovo campo. Dal punto di vista relativo nulla è cambiato, e fisicamente non accade nulla in questo momento. Si vede che, anche dal punto di vista della relatività generale, non è l'arresto brusco dell'impalcatura che genera la catastrofe, ma la pietra sulle rotaie che impedisce la "caduta." Non è meno stupefacente vedere un fatto cosí insignificante, come l'esistenza di una pietra in un punto delle rotaie, legato all'arresto brusco del nostro enorme sistema; è in ciò che si sente l'arbitrio della nostra ipotesi iniziale: a parlare francamente è da insensati ammettere che il treno sia rimasto in quiete; l'esempio è stato scelto da un avversario della teoria della relatività che ha esposto un punto di vista inverosimile per mettere dei bastoni tra le ruote; improvvisare lí per lí la verifica di un'ipotesi cosí assurda, si può dire, non sarebbe certo un titolo di gloria all'attivo della nostra dottrina; le supposizioni arbitrarie che si è obbligati di fare mostrano bene il carattere antinaturale del punto di vista dal quale si è partiti. Infine si può essere urtati dall'apparizione improvvisa del campo di gravitazione. È qui del resto il nodo di tutta la teoria: si può supporre che delle masse cosí distanti, perché sono animate da un movimento relativo prodigioso, possano produrre un campo di gravitazione molto piú intenso di quello che non l'abbia permesso, fino ad ora, la concezione di Newton? Su questa interrogazione terminava il nostro capitolo sulle forze centrifughe. Nei riguardi dell'inerzia, e delle forze centrifughe che agiscono sulla terra, le stelle

hanno certamente una parte, poiché non possiamo riferire altro che ad esse il movimento di rotazione della terra. Sembra quindi logico, data la completa equivalenza dell'inerzia e della gravità, ammettere l'esistenza delle azioni di gravitazione delle stelle.

Terminiamo con una obiezione che può essere fatta alla nostra rappresentazione; i nostri osservatori, si dirà, risentirebbero essi stessi l'arresto brusco della loro impalcatura; essi sarebbero precipitati e non si meraviglierebbero piú che lo stesso fatto fosse capitato al treno, ed essi non ammetterebbero come causa un campo di gravitazione o qualche cosa di simile.

Ma ragionare cosí è un ritornare al punto di vista assolutista delle azioni dello spazio in sé. La confutazione di questa concezione è naturalmente impossibile, poiché essa è costruita tanto logicamente e senza maggiori contraddizioni di quanto lo sia la concezione relativista. I metodi logici, anche se aiutati dall'analisi matematica, non possono far prevalere l'una o l'altra teoria. Non questi metodi, ma una specie di istinto ha condotto Einstein, e Mach molto tempo prima di lui, a preferire la relativista. A lungo andare, è vero, né l'istinto, né l'intuizione devono decidere: la decisione spetta ai fatti, e di questi daremo ora un breve apprezzamento.

XIV

LA PROVA DEI FATTI

Il nostro esposto potrebbe servire, nel campo della relatività, a facilitare al lettore l'intelligenza dei nuovi procedimenti del pensiero, ma non sarebbe onesto lasciar credere che si può considerare questa teoria come un fatto provato dall'esperienza: non si comprenderebbe come alcuni scienziati, molto noti, come l'astronomo v. Seeliger di Monaco, il fisico Lenard di Heidelberg, non aderiscano ad essa. La maggior parte dei fisici hanno, è vero, un'attitudine piú favorevole. Noi tenteremo d'indicare, il piú obiettivamente possibile, i fatti che si possono far valere a pro o contro la realtà.

Abbiamo già parlato di uno spostamento del perielio di Mercurio. Per piccolo che sia, esso è assolutamente innegabile, e chi ne ha calcolato il valore è stato nientemeno che Leverrier, quello che ha scoperto Nettuno. Se si respinge la spiegazione di Einstein ci si mette in una situazione difficile. Non si vede come si potrebbero porre i fatti d'accordo con la legge di Newton, a meno che non si scoprisse il pianeta intra-mercuriale che, nonostante tutti gli sforzi, non è stato mai potuto osservare. È anche possibile che in luogo di esso vi sia una massa di polvere estremamente fine; si è creduto con ciò di spiegare un altro fenomeno misterioso, la luce zodiacale. Tuttavia sino ad oggi, nessuno ha tentato di sviluppare

una teoria che dovrebbe naturalmente precisare con delle cifre la massa, l' estensione, la posizione di questo ipotetico ammasso di polvere, e verificare queste cifre con delle esperienze, in particolare sulla luce zodiacale. Ma non si può senz' altro respingere la possibilità di un fatto inosservato sino ad ora e che renderebbe possibile l' accordo con la legge di Newton.

La deviazione dei raggi luminosi per mezzo del sole può essere considerata come la prova psicologica della teoria che, in questo caso, ha preceduto l' esperienza. Se si poteva supporre che Einstein avesse "aggiustato" le sue formule per dare una ragione del movimento del perielio di Mercurio, lo stesso dubbio invece è assolutamente impossibile per la deviazione dei raggi luminosi.

Non se ne sapeva assolutamente nulla prima di Einstein; per quanto straordinario ciò sembri, per quanto numerose siano state le fotografie di ecclissi totali di sole prese da astronomi sperimentati (poiché si sa la grande importanza che da lungo tempo si attribuiva all' osservazione di questo fenomeno raro), non se ne aveva nemmeno una che potesse permettere di verificare l' azione supposta. Si è dovuto dunque attendere un nuovo ecclissi, quello del maggio 1919.

Le fotografie prese allora e le misure microscopiche sulle lastre confermarono assolutamente, all' ingrosso, i calcoli di Einstein, ma rilevarono tuttavia delle differenze che non sono completamente trascurabili.

Le cifre seguenti sono tratte da una comuni-

cazione di v. Laue (*Naturwissenschaften*, 1920, p. 391; vedere anche il resoconto ufficiale di E. Freundlich, p. 667):

Stelle[1] n°	Spostamento in secondi d'arco nella direzione: da Sud a Nord		da Est ad Ovest	
	Osservata	Calcolata	Osservata	Calcolata
11	+0.16	+0.02	−0.19	−0.22
5	−0.46	−0.43	−0.29	−0.31
4	+0.83	+0.74	−0.11	−0.10
3	+1.00	+0.87	−0.20	−0.12
6	+0.57	+0.40	−0.10	+0.04
10	+0.35	+0.32	−0.08	+0.09
2	−0.27	−0.09	+0.95	+0.85

Per valutare questi risultati, bisogna sempre ricordarsi che un secondo d'arco corrisponde ad 1 millimetro visto da una distanza di 200 metri. Non si può dunque dubitare dell'esistenza della deviazione. Ma si è obiettato ch'essa potrebbe derivare dalla rifrazione nell'atmosfera solare; questa rifrazione esiste certamente per tutta l'estensione di questa atmosfera, e la sua importanza deve dipendere dalle proprietà, dalla densità, dalla temperatura dei gas etc.... È assolutamente inutile pensare ad ottenere su tutte queste grandezze dei dati abbastanza sicuri, spogliati delle condizioni d'osservazione, e di fondare col loro aiuto una teoria che le cifre precedenti verificherebbero. Al contrario da queste cifre si potrebbero dedurre dei dati sull'atmosfera solare. Ma anche qui la teoria e i fatti si accorderebbero tra di loro appena un po' di piú che non nell'ipotesi di Einstein, edificata prima delle esperienze.

[1] La stella n° 1 manca, non avendo la corona solare permesso un'osservazione netta; le stelle 7, 8, 9, per altre ragioni. Le stelle sono poste in ordine della loro prossimità al sole.

D' altra parte E. Freundlich fa giustamente notare che l' atmosfera solare necessaria per questa spiegazione, a giudicarne almeno dalla nostra esperienza terrestre, assorbirebbe la luce delle stelle molto piú di quello che non lo mostri l' osservazione. Secondo lui la maggior parte di quelle, le cui fotografie svelano la deviazione dei raggi, non potrebbero piú impressionare le lastre.

Si sono anche tentate altre spiegazioni di questa deviazione: la si è voluta ricondurre a dei fenomeni che, come la " rifrazione annuale " di Courvoisier, sono tutt' affatto incerti e discussi, e che anche nel caso piú favorevole, non potrebbero dare che una spiegazione parziale.

Allo stato di fatto è piú naturale considerare l' effetto Einstein come reale, piuttosto che tentare di ricondurre la deviazione, provata dall' esperienza, ad una rifrazione ancora sconosciuta o a qualche altra causa accessoria.

Una terza possibilità di verificare la teoria con i fatti, cioè lo spostamento delle linee spettrali verso il rosso, ha avuto una grande importanza nelle discussioni di questi ultimi tempi. Ecco di che si tratta: si sa che le onde di una luce monocromatica si succedono con la massima regolarità ad intervalli di tempo straordinariamente brevi. Questa regolarità le designa precisamente come adatte alla misura del tempo, cioè a servire da cronometri. Ora noi sappiamo che la marcia dei cronometri dipende dal loro stato di movimento; noi abbiamo visto di piú che i movimenti accelerati possono essere rimpiazzati da campi di gravitazione; questi dunque

debbono avere un' influenza sulla marcia dei cronometri, e sarebbe facile, se ciò non dovesse condurci troppo lontano, dimostrare che tutti i campi di gravitazione esercitano un' azione ritardatrice. In ciò che concerne le vibrazioni luminose, le rosse sono, tra tutte quelle dello spettro, quelle che vibrano meno spesso. Uno spostamento dello spettro verso il rosso corrisponde quindi ad un ritardo dei cronometri; siccome non si può misurare questo spostamento che sulle linee spettrali, le linee di Fraunhofer, la teoria della relatività esige per essere verificata che queste linee, quando provengono da stelle, a campo di gravitazione intenso, siano spostate verso il rosso.

Il grande ostacolo a questa verifica è che un movimento il quale allontani la sorgente luminosa genera uno spostamento nello stesso senso. In questo caso l'occhio è infatti impressionato nello stesso tempo da un minor numero di vibrazioni di quando la sorgente è in quiete; queste vibrazioni appaiono dunque meno frequenti, vi è quindi spostamento verso il rosso. Distinguere questo fenomeno, chiamato effetto Döppler, indipendente dalla teoria della relatività, dall' effetto Einstein presenta delle grandi difficoltà pratiche. È con lo spettro solare che si può sperare una soluzione, poiché il movimento del sole rispetto alla terra è ben conosciuto, il che consente di tenerne conto. Nonostante tutto, il fatto non è ancora indubitabilmente provato, le diverse osservazioni non concordano; una soluzione definitiva è affare di qualche anno ancora.

Riassumendo, i fatti che permettono una verifica sperimentale diretta non formano certamente un insieme molto vasto; esaminandoli si può dire in ogni caso, che non se ne conosce alcuno che contraddica la teoria della relatività, e che al contrario parecchi creano per lo meno delle difficoltà alle vecchie concezioni. D'altra parte però bisogna pur ammettere che se noi scoprissimo dei fatti cosí particolari e cosí poco numerosi come quelli di cui abbiamo parlato, e che contraddicessero una legge naturale ben riconosciuta, per esempio il principio della conservazione dell'energia, non vi è alcun dubbio che noi non ci riterremmo obbligati a rinunziare a questa legge, altrove tanto magnificamente dimostrata; si lavorerebbe con tutte le forze a lumeggiare la contraddizione; nel caso piú favorevole si lascerebbe all'avvenire la cura di procedere all'esecuzione.

È lo stesso nel nostro caso; non si può considerare male il fatto che un uomo ritenga tanto provata la vecchia concezione assoluta dello spazio e del tempo da non poter decidersi a disfarsene per alcune singolarità, quasi impercettibili nel campo infinito dei fatti, ed a rifiutare di condannare subito una convinzione ch'egli ha nutrito per anni. Tuttavia un gran numero di fisici di tendenze filosofiche, e prima di tutti i discepoli di Ernesto Mach, morto nel 1915, il cui portavoce può essere salutato in Petzoldt, considerano la concezione relativista come la piú perfetta.

Passiamo al lato matematico della teoria. Alcuni matematici, Riemann fra gli altri, avevano

introdotto una concezione dello spazio che, molto tempo prima di Einstein, si trovava esattamente d'accordo con le esigenze della sua fisica. Allorché duecento anni avanti l'êra cristiana Apollonio scrisse il suo libro sui coni, delle menti, unicamente preoccupate della utilità immediata, potevano ben domandare qual era lo scopo di questi studi su delle curve che la natura non ci mostra. Lo "scopo" fu trovato quando diciotto secoli piú tardi Keplero enunciò le sue leggi. Una volta ammessa la teoria della relatività, si trova una relazione analoga tra la fisica di Einstein e le speculazioni di Riemann (su queste molto interessanti questioni vedere la Bibliografia). Con ciò cade l'accusa lanciata contro Einstein di aver plagiato Mach, Riemann ed altri, biasimo altrettanto ridicolo di quello che si facesse a Keplero di aver copiato Apollonio, e a Wagner in rapporto a Schopenhauer, sotto pretesto che le tendenze della musica wagneriana coincidono con quelle della filosofia di Schopenhauer.

XV

CONSEGUENZE COSMOLOGICHE[1]

Tra le conclusioni che Einstein ha tratto dal suo cambiamento delle concezioni dello spazio e del tempo, nessuna ha prodotto tanta sensazione come quella che, riferendosi all'infinità del mondo,

[1] Per questo capitolo grande incitamento ho ricevuto da molteplici conversazioni avute col Prof. Dr. Böhmer di Dresda.

lo sostituisce con un universo illimitato, ma definito e chiuso. Se noi vogliamo approfondire questa questione è bene aiutarsi con una immagine che Helmholtz ha usato nel suo celebre trattato: *Gli assiomi della geometria*. In esso egli parla di esseri immaginari “superficiali”, i quali non possono vivere che in due dimensioni, per esempio in un piano, i quali non percepiscono sensazioni se non in quanto la loro causa è in questo piano, e non possono risentire alcuno dei fenomeni della terza dimensione: è cosí ch' essi non noterebbero un lancio di pietra scagliata contro di loro. Rinvio i curiosi di tali speculazioni allo scritto satirico di Fechner: “L' ombra è vivente” (vedere nota pag. 83).

Immaginiamo ancora che questi esseri non dispongano che di una piccola distesa, per esempio un giardino; in confronto alla terra è ancora molto superiore allo spazio che noi uomini possiamo raggiungere in rapporto al mondo delle stelle. Sorge una discussione tra di loro per decidere se essi si trovano veramente su di un piano o se sono invece sulla superficie di una sfera; la maggioranza si dichiara per la prima ipotesi, la minoranza, che comprende le menti piú sottili, per la seconda. Metterle d' accordo sarà molto difficile: noialtri, esseri a tre dimensioni, percepiamo subito la differenza di un piano e di una sfera, ma per ciò fare la terza dimensione ci è assolutamente necessaria. Rappresentiamoci un essere ad una dimensione, che non si sposti altro che linearmente, per allungamento e contrazione per esempio; esso non potrà evi-

dentemente mai sentire la differenza tra una retta ed una curva. Poiché tutte le operazioni o definizioni che servono a distinguere la retta — piú corta distanza fra due punti, linea che se ripiegata, ricopre se stessa —, suppongono almeno un piano. Alla stessa maniera, in uno spazio a due dimensioni non si può sentire la differenza di un piano e di una superficie curva: sarebbe assolutamente necessario di collocarli nello spazio a tre dimensioni; il problema è dunque insolubile, anche con ragionamenti matematici; tutti e due sono dei concetti non contradittorî, essi quindi esistono matematicamente. Ammettendo che i movimenti dei nostri esseri a due dimensioni siano limitati sulla superficie sferica, essi non possono risolvere la questione.

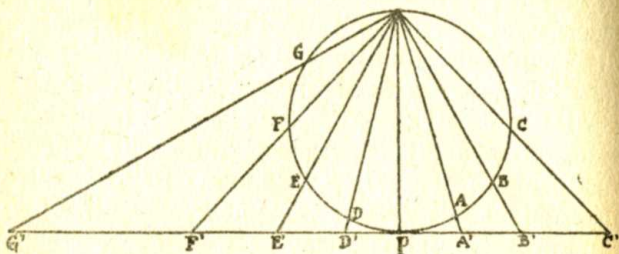
Sopprimiamo questa restrizione; accordiamo ai nostri amici una notevole libertà: solo il giro della terra resta loro interdetto. Si vede allora che non sarà loro difficile di acquistare una certezza sulla natura matematica della loro patria; tuttavia noi sappiamo ch' essi non possono immaginarsi in maniera concreta la differenza delle due concezioni possibili; ma ciò nondimeno non deve essere loro difficile di risolvere la questione: si metterà facilmente in evidenza la curvatura della superficie terrestre, anche senza far valere le ragioni conosciute, le quali suppongono l'esistenza della terza dimensione (gli alberi di una nave che si avvicina appaiono per i primi sull' orizzonte; l'orizzonte si allarga a mano a mano ci eleviamo su di un' altura). È sufficiente misurare gli angoli di un triangolo qualsiasi; si sa che,

in un piano, la loro somma è sempre uguale a due retti; sulla sfera i lati degli angoli non sono delle rette nel senso ordinario, sono delle porzioni di cerchio, e la somma è sempre superiore a due retti; questa misura d' angoli non avendo bisogno di rappresentazione nella terza dimensione è ben possibile per i nostri esseri a due dimensioni.

Arriviamo all' essenziale. Il teorema fondamentale sull' eguaglianza a due retti della somma degli angoli di un triangolo, non è valevole altro che nella geometria euclidea; nella geometria non euclidea, assolutamente logica in sé, la loro somma ha un valore superiore. Se, quindi, i nostri esseri a due dimensioni, misurando gli angoli di un triangolo, trovano per essi una somma superiore a due retti, sono assolutamente liberi o di dire: "Finalmente è dimostrato che il vecchio padre Euclide si è sbagliato; noi vediamo che i tre angoli di un triangolo non fanno due retti, come ha voluto farci credere, ma di piú" o al contrario: "è evidente che Euclide ha ragione e noi sappiamo finalmente che abitiamo la superficie di una sfera." Non vi è bisogno di aggiungere che nel primo caso si ammette un mondo infinito, nel secondo un mondo illimitato chiuso, ma finito.

Noi vediamo cosí, che la geometria è, per cosí dire, il regolo col quale uno fa la sua misura e secondo la scelta alla quale si ferma trova un mondo finito od infinito. La spiegazione seguente sarà forse piú chiara: noi siamo abituati a considerare i nostri regoli graduati come restanti invariabili, "rigidi" come diciamo. Non è meno

vero che dal punto di vista della teoria della relatività ciò è un' ipotesi gratuita. Per noi le distanze *PA, AB, BC, PD, DE, EF, FG,* sono uguali, men-

tre che *PA', A'B', BC'*, e *PD', DE', E'F', F'G'*, diventano di mano in mano piú grandi. Supponiamo ora che un uomo si sposti sulla retta con un regolo che s' ingrandisce costantemente a misura ch' esso si allontana da P, in modo che le lunghezze *PA', A'B', B'C'*, etc. gli appariranno uguali egli troverà dunque i risultati, che noi troviamo per il cerchio, egli prenderà la retta per una curva e il piano per una sfera. Immaginiamo invece un osservatore che si allontani da P sul cerchio con un regolo che diminuisce; le lunghezze uguali *PA, AB, BC,* etc, gli sembra si allunghino come a noi *PA', A'B', BC'*, etc; egli s' immaginerà di camminare su di una retta e in conseguenza prenderà la superficie finita della sfera per un piano infinito.

Si vede dunque che io considererei la stessa superficie come un piano infinito o come una sfera finita, a seconda della geometria che avessi scelto e i principî di misura che ne dipendono.

Abbandoniamo i nostri esseri a due dimensioni e ritorniamo al nostro problema a tre dimensioni. Qui ci è necessario rinunziare naturalmente a guardare nello spazio. Poiché se noi volessimo sentire la differenza dello spazio infinito euclideo e dello spazio finito chiuso, il quale in tre dimensioni corrisponde alla sfera in due, ci sarebbe necessario situarli nello spazio a quattro dimensioni, come ci è stato necessario situare il piano e la sfera nello spazio ordinario. Ora lo spazio a quattro dimensioni non ci è sensibile anche a titolo di rappresentazione ausiliaria.

È un fatto ben conosciuto dai matematici che vi sono, a seconda degli assiomi presi come base, differenti geometrie, matematicamente parlando equivalenti. La scelta della geometria decide, come abbiamo visto, intorno alla maniera secondo la quale noi concepiamo lo spazio. La relatività generale esige la geometria di Riemann e non quella di Euclide, essa deve quindi proclamare lo spazio finito e chiuso. Ci condurrebbe peraltro troppo per le lunghe il metterci d'accordo sul fatto che l'intima connessione tra lo spazio e il tempo non porta in alcun modo la conseguenza che il tempo sia finito, come talora erroneamente si afferma.

Si fa, è vero, un'obiezione; si potrebbe dire: io suppongo un mondo euclideo; in mezzo un sistema di assi rettangolari, poi mi metto a misurare in linea retta con un regolo chilometrico; che cosa mi può succedere? Non posso cadere su di una barriera che chiuda il mondo, la mia misurazione continuerà sempre e per conseguenza il

mondo è infinito. A ciò si può rispondere: il punto di vista è matematicamente inconfutabile nessuno dubita dell'assenza di contraddizione geometrica nello spazio euclideo: la sola questione è di sapere se conviene fisicamente. Se, per esempio, le linee secondo le quali noi collochiamo i nostri regoli non fossero né quelle che segue la luce, né quelle che percorre un corpo abbandonato a se stesso, noi saremmo meravigliati e ci domanderemmo a qual diritto noi continueremmo a chiamarle rette e se non fosse piú da savi cambiare la geometria piuttosto che capovolgere la fisica intera.

Aggiungiamo ancora questo: il mondo non è continuo. Mostra al contrario dei corpi enormi e degli atomi infinitesimali. Supponiamo che il nostro osservatore euclideo sia stato inviato a misurarlo. Egli a tutta prima percorre i dintorni del sistema solare, qualche centinaio d'anni luce, per esempio. Egli determina in questa occasione una grandezza media delle stelle, poi si sposta in una direzione qualsiasi nell'universo. Se, continuando la sua corsa, astrazion fatta delle particolarità individuali, egli trova che in media le stelle s'ingrandiscono a mano a mano, il nostro uomo si dirà: "Qui c'è qualche cosa che non va piú. Perché mai nell'universo intero è proprio il mio punto di partenza che possiede questa bizzarra proprietà: i corpi celesti considerati a partire da questo posto pare s'ingrandiscano a misura che si allontanano. Ciò dipende certamente dal mio regolo; è chiaro ch'esso deve diminuire e crearmi la illusione di un ingrandimento crescente delle

stelle e dell' infinità del mondo. Se io prendo, come nella figura precedente, la linea curva chiusa al posto della retta, tutte queste deformazioni, evidentemente anti-naturali, cesseranno." E ciò che accade in grande per i corpi celesti, accade in piccolo per gli atomi: si può considerare come dimostrato dai risultati della spettroscopia che tutti gli astri posseggono degli atomi identici ai nostri. Quindi solo per mezzo di considerazioni fisiche, giammai puramente matematiche, potrà essere sciolta la questione della infinità o meno del mondo a seconda della geometria che si sceglie e dei principî che ne dipendono. Noi abbiamo un piú semplice criterio ancora di quello piú sopra citato: in un mondo finito vi è solo un numero finito di corpi celesti e quindi di atomi. "Il numero dei corpi celesti in grande e degli atomi in piccolo, è quindi quello che risolverà in via definitiva la questione se il mondo sia finito o infinito." La teoria della relatività generale quindi deve accettare questi numeri come finiti ed in ciò appunto consiste la sua piú singolare conclusione.

Einstein ha dato una formula che permetterebbe di calcolare la grandezza del suo universo sferico, ma essa suppone la conoscenza della ripartizione media delle masse nell' universo, ripartizione sulla quale i dati sono molto imprecisi.

La concezione di Einstein sembra dover trarre l' astronomia da una posizione ben penosa. Se si ammette uno spazio infinito che presenti una ripartizione presso che regolare delle stelle — tra-

scureremo le irregolarità locali — si cade in effetti in una difficoltà. Figuriamoci una sfera descritta attorno a noi, che ne costituiamo il centro, e cosí grande che delle piccole ineguaglianze non siano in essa percettibili; le stelle che vi si trovano, ci inviano una certa quantità di luce. Raddoppiamo il raggio della sfera: ogni stella si troverà in media due volte piú lontano, e noi non percepiremo che il quarto della luce ch' essa ci inviava. Ma nello stesso tempo il volume della sfera, e con esso il numero delle stelle, se noi ammettiamo una ripartizione regolare, è stato moltiplicato per otto. E poiché noi possiamo naturalmente continuare cosí, raddoppiare il raggio della sfera, per quanto grande esso sia diventato, triplicarlo, quadruplicarlo, si dimostrerebbe che ogni punto di tutto il firmamento dovrebbe brillare in media di una luce pari a quella del sole.

Per evitare questa conclusione assurda, si dovrebbe ricorrere alle masse oscure o ad un assorbimento della luce da parte dello spazio, in ogni caso, ad un' ipotesi appositamente ideata. Rimarrebbe pur sempre invariata analoga difficoltà nei riguardi dell' azione di gravitazione delle stelle. In conseguenza l' astronomia deve prescindere dalla ipotesi di una eguale ripartizione di tutte le stelle sino all' infinito.

Certo tutte queste speculazioni non possono terminare se non con un punto interrogativo, che non può essere tolto per ragioni dipendenti da cognizioni generali teoriche. Esse sono valevoli solo per la ipotesi di un uguale empimento

dello spazio con la materia, per un' ipotesi cioè che non può essere dimostrata astronomicamente e neppure ha la necessaria connessione con i principî base della Teoria della Relatività generale.

Se io, nonostante seri dubbi sulle questioni accennate, ho compilato questo capitolo, l' ho fatto non solo perché la sua mancanza nelle precedenti edizioni fu considerata da molte stimate voci un difetto, ma anche perché questi problemi in effetti hanno suscitato un generale interesse; il lettore dunque si aspetterà un capitolo che li riguardi. Inoltre in altri scritti di volgarizzazione riguardanti il nostro tema mi sembra che le questioni su accennate siano state trattate non sempre e da tutti con la necessaria e giusta precauzione.

XVI

RAFFRONTO CON COPERNICO

Tutti sono d' accordo nel meravigliarsi della sottigliezza e piú ancora della miracolosa indipendenza di mente di un Lorentz, di un Minkowski e sopratutto di un Einstein. Ma piuttosto che questi apprezzamenti il lettore domanda che gli si denotino in modo concreto le opere di questi scienziati; un raffronto ci permetterà di fare ciò. E già molto tempo del resto che tal raffronto è stato trovato. Di tutti i grandi fatti della Scienza non ve n' ha alcuno che abbia con la rivoluzione einsteiniana maggiore analogia di

quello di Copernico, non solo per il merito, ma per la messa in rilievo dei punti di vista concreti. A me sembra che il raffronto vada molto piú lontano di quello che ordinariamente si ammette, perché si giudica in modo ingiusto non la teoria di Einstein, ma quella di Copernico. Chi non è astronomo in genere pensa che l'unico dovere, o almeno il dovere principale dell'astronomia, sia quello di stabilire se la terra è in movimento, e siccome Copernico ha condotto questo problema a buon fine, egli resta "l'astronomo" per l'eternità. Ma di questa concezione non è qui il luogo di parlare. Come ogni altra scienza, l'astronomia deve osservare, poi raccogliere ed ordinare le sue osservazioni in una teoria. Questo secondo dovere essa lo compiva in altri tempi in una maniera che, ai nostri giorni appare molto insufficiente, ed è a causa del principio di relatività cinematica che la concezione di Copernico poteva appena giovarle in ciò. Quel che essa poteva far valere in suo favore non era evidentemente una migliore messa in ordine dei fatti, ma una straordinaria unificazione della intera teoria per mezzo dell'introduzione di un punto di vista assolutamente nuovo. Gran parte dell'astronomia pratica ed anche teorica non veniva con ciò ad essere toccata, e poteva passare completamente nella nuova dottrina. Accade lo stesso per alcune vaste branche della fisica, e per quasi tutta l'astronomia nella teoria della relatività. Ciò che le due concezioni potevano far valere non erano in prima linea dei fatti, ma la grande importanza dell'unificazione e della semplifica-

zione di tutta la teoria ch' esse permettevano. Quanto alle prove definitive è notevole che per queste due teorie, cosí fondamentalmente sovversive, non si possa trovarle se non nell' osservazione di grandezze infime, appena percettibili. La prima prova vera della teoria di Copernico fu l' aver stabilito il periodo annuale dell' aberrazione, di cui abbiamo parlato a pag. 65 e che non poteva essere percepita che da un osservatore esercitato munito di un istrumento ottico. Si vede che grandezze cosí deboli possono acquistare un significato anche nei grandi problemi relativi alle nostre concezioni dell' Universo.

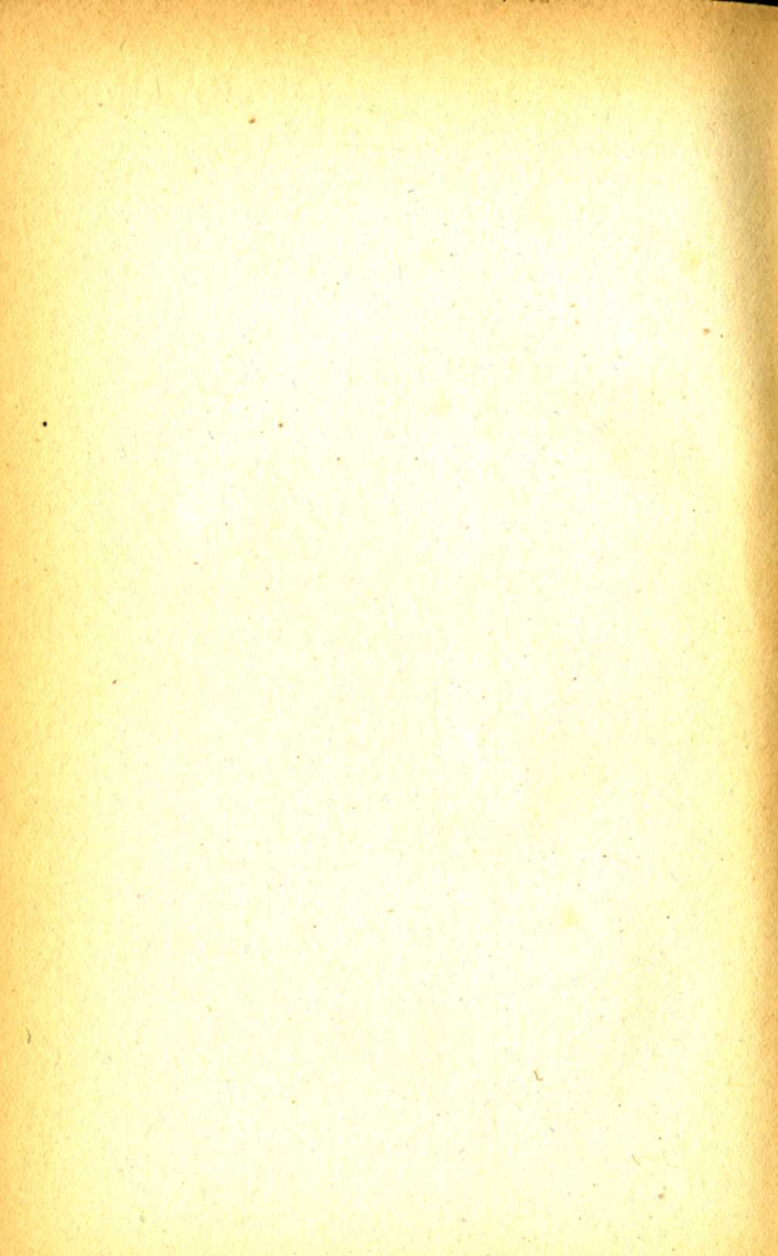
Si pretende spesso che la questione della Relatività non potrà mai avere l' importanza di quella dei sistemi eliocentrico o geocentrico, e che inoltre essa non può avere per il gran pubblico una grande significazione perché troppo difficile a comprendersi. Ma è anche tanto difficile rappresentarsi ciò che ha potuto capire delle idee di Copernico un cervello di media levatura, contemporaneo della Riforma, quanto predire l' influenza profonda della teoria della relatività sulle menti da qui a qualche secolo. Noi possiamo rimanere indecisi e rinunziare a decidere su ciò che fu maggiormente rivoluzionario, cioè sulla costruzione in ogni caso tanto straordinaria e per cosí dire "estensiva" del nostro sistema solare, o sullo sconvolgimento e la nuova interpretazione, forse meno grandiosa ma tuttavia tanto profonda e penetrante, tanto "intensiva," delle nostre idee sullo spazio e sul tempo. Ciò che importa soprattutto è che le due concezioni hanno avuto il co-

raggio, per semplificare ed unificare, di considerare come relativo un concetto giudicato sino ad allora assoluto. Poiché l' essenziale nell' opera di Copernico è che il concetto dello stato di quiete diventa relativo da assoluto come sembrava con la terra fissa.

Anche gli ostacoli che sono sorti davanti a questi due tentativi di progresso sono analoghi. Il senso comune risente come una negazione dei valori psicologici la relatività delle leggi ch' esso considera come assolute, e si mette in guardia. L' esperienza quotidiana, quella, per esempio, dello stato di quiete della terra o della invariabilità delle misure del tempo e dello spazio, fa sempre sentire la sua influenza e tende a prendere un valore assoluto, senza condizioni, anche molto al di là del campo dove essa ha agito. Contro di essa appunto, la critica e la teoria sostengono una lotta ostinata.

L' avvenire dirà se le nuove idee riporteranno anche per la relatività una vittoria definitiva e completa.

In un punto tuttavia la lotta sarà almeno piú facile che al tempo di Copernico: ciò che a lui sopra tutto si è rimproverato non è d' aver messo la terra in movimento in quanto sistema fisico, ma di aver toccato il carattere religioso che vi si collegava, poiché era ferire i contemporanei di Lutero, sin nel loro piú profondo, il mettere il piedestallo della Divinità, il teatro degli atti del Salvatore del mondo, all' altezza di Venere o di Marte. La nostra nuova teoria non avrà da combattere il valore reale od immaginario di queste idee, essa

non avrà né il rogo per un Bruno, né l'inquisizione per un Galileo. Da allora, il rispetto delle opinioni altrui e l'incivilimento generale hanno progredito alquanto, benché molti fatti, troppo conosciuti, dimostrano che non bisogna troppo pretendere a questo riguardo.

BIBLIOGRAFIA

a) Opere scientifiche

Le memorie fondamentali di LORENTZ, EINSTEIN, MINKOWSKI sono state riunite nella collezione: 'Fortschritte der Mathematischen Wissenschaften in Monographien.' Teubner, editore, fasc. 1°, 1910; fasc. 2°, 1913.

M. VON LAUE. *Das Relativitätsprinzip*. Brunswick. 1911.

H. WEYL: tratta della teoria della relatività generale in: 'Raum, Zeit, Materie.' 3ª ediz. Berlino, 1920.

b) Opere di volgarizzazione

A. EINSTEIN. *Spezielle und allgemeine Relativitätstheorie*. Collezione Vieweg. 12ª ediz.

W. BLOK. *Aus Natur und Geisteswelt* (Teubner) Vol. 618. È una buona introduzione, matematicamente elementare, alla teoria della relatività generale.

A. ANGERSBACH. Vol. 39 della Math. Physik. Bibliothek (Teubner); dà un grande numero di esempi nei quali il calcolo viene accuratamente fatto sino alla fine.

M. BORN. *Die Relativitätstheorie Einsteins und ihre phisikalischen Grundlagen*. Springer, edit. Berlino. Ottima particolareggiata esposizione.

W. BRUNNER. *Dreht sich die Erde*. Vol. 17 della Math. - Physik. Bibliothek.

KIRCHBERGER. *Mathematische Streifzüge durch die Geschichte der Astronomie*. Vol. 40 della Math. Physik Bibliothek.

M. Schlick. *Raum und Zeit in der gegenwärtigen Physik.* Springer, editori. 3ª ediz. 1920. Eccellente introduzione alla teoria della relatività generale.

Erwin Freundlich. *Grundlagen der Einsteinschen Gravitationstheorie.* Springer edit. 4ª edizione 1920. Tratta la materia matematicamente.

Arthur Haas. *Die Physik als geometrische Notwendigkeit. — Die Naturwissenschaften.* 1920. Pagg. 121. Trattato matematico sui rapporti con la geometria.

Dello stesso: *Axiomatik der modernen Physik,* della stessa raccolta 1919. Pagg. 744.

Helmholtz. *Vorträge und Reden.* Vol. 2ª, pag. 1. Brunswick. 1896.

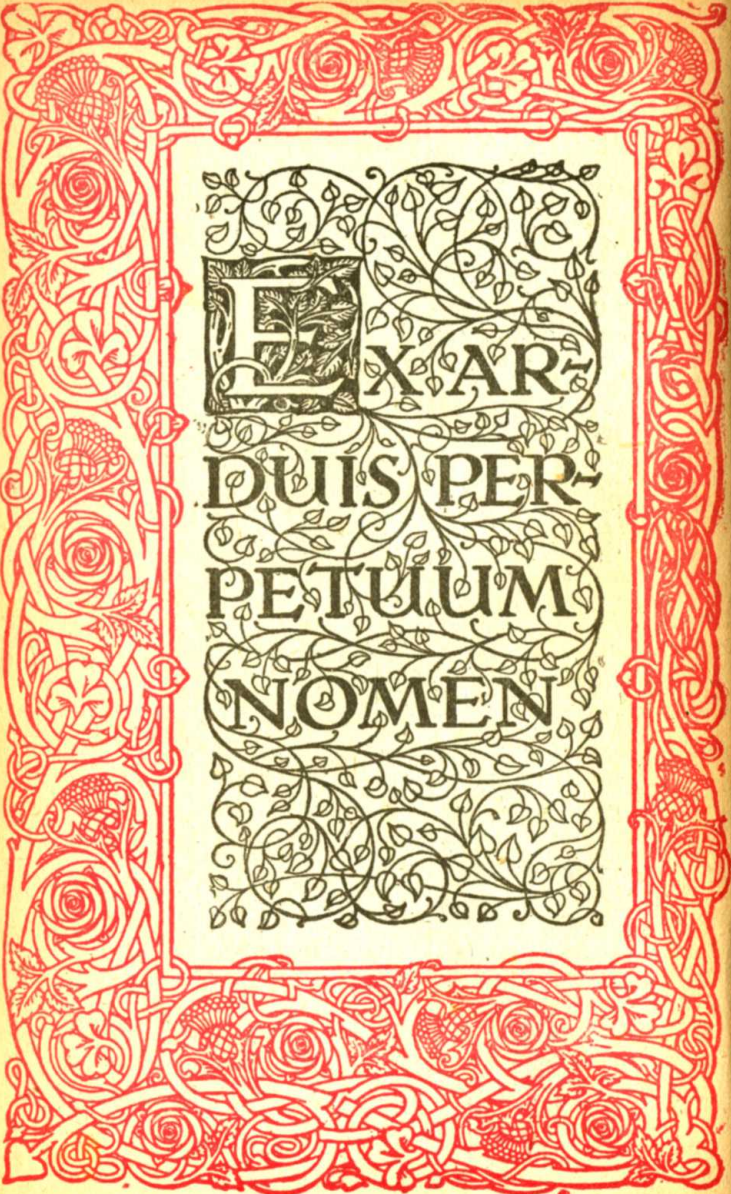
Einstein. *Dialog über die Einwände gegen die Relativitätstheorie. Die Naturwissenschaften.* 1918. Pagg. 697.

c) Opere filosofiche

J. Petzoldt. *Stellung der Relativitätstheorie in der geistigen Entwicklung der Menschheit.* Dresda, Sibyllenverlag, 1921. L'opera si attiene al punto di vista del positivismo di Mach.

Ernst Cassirer. *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie.* Berlino, 1921 (Bruno Cassirer). L'opera si attiene al punto di vista del sistema di Kant.

Ilse Schneider. *Das Raum-Zeitproblem bei Kan und Einstein.* Springer, 1921.

Hans Reichenbach. *Relativitätstheorie und Erkenntnis a priori.*

Otto Siebert. *Albert Einsteins Relativitätstheorie und ihre kosmologischen und philosophischen Konsequenzen.* Langensalza, 1921.

INDICE

G. CARABBA. STAMP. IN LANCIANO.
GIUGNO 1923

EX AR-
DUIS PER-
PETUUM
NOMEN